

TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER
SIRKULAR SEBAGAI PENGANGGU ALIRAN DI
DEPAN SISI *RETURNING BLADE* TURBIN ANGIN
SAVONIUS TERHADAP PERFORMA TURBIN
“Studi Kasus untuk Rasio Diameter ($d/D=1$)”**

IELMAN WAHID NAWAZIR
NRP 2112 100 174

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA.

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017**



TUGAS AKHIR – TM141585

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER SIRKULAR
SEBAGAI PENGANGGU ALIRAN DI DEPAN SISI
RETURNING BLADE TURBIN ANGIN SAVONIUS TERHADAP
PERFORMA TURBIN
“Studi Kasus Untuk Rasio Diameter (d/D)=1”**

IELMAN WAHID NAWAZIR
NRP. 2112 100 174

Dosen Pembimbing:
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

PROGRAM SARJANA
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017



THESIS – TM141585

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF CIRCULAR
CYLINDER AS A DISTURBANCE POSITION IN FRONT OF
RETURNING BLADE OF SAVONIUS WIND TURBINE TO THE
TURBINE PERFORMANCE**

“Case Study for the ratio of the diameter $(d/D)=1$ ”

IELMAN WAHID NAWAZIR
NRP. 2112 100 174

Advisory Lecturer:
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

PROGRAM SARJANA
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER
SIRKULAR SEBAGAI PENGANGGU ALIRAN DI
DEPAN SISI *RETURNING* TERHADAP PERFORMA
TURBIN ANGIN SAVONIUS**

“Studi Kasus untuk Rasio Diameter ($d/D=1$); Variasi Jarak
($S/D=1,5 \leq S/D \leq 2,4$; dan $Re = 3,0 \times 10^4, 6,0 \times 10^4, 9,0 \times 10^4$ ”

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

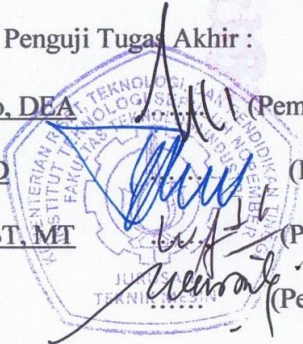
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

IELMAN WAHID NAWAZIR

NRP. 2112 100 174

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA (Pembimbing)
NIP. 196001291987011001
 2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD (Penguji I)
NIP. 196412281990031002
 3. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT (Penguji II)
NIP. 197104051997021001
 4. Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT (Penguji III)
NIP. 196202161995121001
- 

**SURABAYA
JANUARI, 2017**

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER Sirkular SEBAGAI PENGANGGU ALIRAN DI DEPAN SISI *RETURNING BLADE* TURBIN ANGIN SAVONIUS TERHADAP PERFORMA TURBIN

“Studi Kasus Untuk Rasio Diameter (d/D) = 1”

Nama Mahasiswa : Ielman Wahid Nawazir
NRP : 2112 100 174
Jurusan : Teknik Mesin FTI - ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRAK

Penggunaan pembangkit berbasis Energi Baru dan Terbarukan (EBT) di Indonesia masih cukup rendah, khususnya pada energi angin yang masih sangat rendah. Kecepatan angin di Indonesia berkisar antara 3 m/s hingga 6 m/s. Pada rentang kecepatan angin tersebut, pemanfaatan turbin Savonius sangat sesuai diterapkan untuk meningkatkan penggunaan energi terbarukan. Jenis turbin ini dapat menghasilkan daya dengan memanfaatkan gaya drag yang dihasilkan oleh setiap sudu turbin, dimana gaya drag yang dihasilkan pada Advancing Blade dan Returning Blade akan menghasilkan torsi. Apabila selisih gaya drag semakin besar, maka daya yang dihasilkan oleh turbin akan semakin besar. Salah satu cara untuk memperbesar selisih gaya drag dengan mengurangi gaya drag pada returning blade yaitu dengan cara meletakkan benda pengganggu berupa silinder sirkular di depan returning blade dengan variasi jarak (S/D).

Pada penelitian kali ini dilakukan dengan menggunakan turbin angin Savonius dengan diameter (D) = 101,6 mm dan tinggi turbin yaitu 300 mm. Silinder pengganggu diletakkan di depan returning blade memiliki diameter (d) = 101,6 mm dan tinggi yaitu 500 mm. Pada penelitian ini dilakukan variasi jarak penempatan silinder pengganggu dengan returning blade S/D = 1,5, 1,6, 1,7, 1,8, 1,9, 2,0, 2,1, 2,2, 2,3 dan 2,4. Percobaan dilakukan dengan variasi Reynolds Number sebesar $3,0 \times 10^4$, $6,0 \times 10^4$ dan $9,0 \times 10^4$.

104 yang dihitung berdasarkan kecepatan freestream (V) dan panjang karakteristik ($L=2D-b$). Penelitian dilakukan dengan menggunakan aliran udara yang dihasilkan oleh blower, dimana turbin angin Savonius diletakkan pada jarak sejauh 4 m dari blower. Kecepatan dan temperatur angin dapat diamati dengan dilakukan pengukuran dengan memasang alat berupa anemometer. Kemudian dilakukan pengukuran putaran poros turbin angin dengan menggunakan Tachometer. Selanjutnya dilakukan pengukuran dengan menggunakan Torque meter untuk mendapatkan besar torsi statis. Daya yang dihasilkan turbin didapatkan dengan mengukur torsi dinamis yang dihasilkan turbin dengan menggunakan Brake Dynamometer, besarnya daya yang dihasilkan dapat dihitung dengan hasil torsi dinamis serta kecepatan putaran yang dihasilkan turbin.

Studi eksperimen ini menunjukkan hasil bahwa pengaruh dari konfigurasi silinder pengganggu efektif untuk meningkatkan kinerja dari turbin angin Savonius. Hal ini ditunjukkan dengan peningkatan nilai kecepatan rotasi turbin (n), torsi statis turbin (T_{statis}), dan coefficient of power (CoP) ketika turbin angin Savonius diberi konfigurasi silinder pengganggu dengan turbin angin Savonius yang tidak diberi gangguan. Nilai coefficient of power yang paling besar diperoleh pada $S/D = 1,6$ untuk $Re = 6,0 \times 10^4$ sebesar 25,05%. Nilai maksimum coefficient of power diperoleh pada nilai tip speed ratio sebesar 0,95. Sementara kecepatan putaran dari turbin angin Savonius yang diperoleh pada $S/D = 1,6$ untuk $Re = 6,0 \times 10^4$ memiliki nilai sebesar 472,63 rpm dengan torsi statis yang diperoleh sebesar 8,8 N-cm.

(Kata kunci : Turbin angin Savonius, silinder pengganggu, *coefficient of power*)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF CIRCULAR CYLINDER AS A DISTURBANCE POSITION IN FRONT OF RETURNING BLADE OF SAVONIUS WIND TURBINE TO THE TURBINE PERFORMANCE

“Case Study for the ratio of the diameter (d/D) = 1”

Name : Ielman Wahid Nawazir
NRP : 2112 100 174
Major : Teknik Mesin FTI - ITS
Advisory Lecturer : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRACT

In Indonesia, the alternative non-fossil energy have lower percentage to be the priority in electrical purpose. For example, wind energy is the kind of the alternative non-fossil energy that never been used in a high frequent. The Savonius wind turbine provide the energy using the principal drag force which the drag force on the advancing blade has the bigger value than the drag force on the returning blade. The difference from that blade can provide the torque on the turbine. This experiment has a purpose to make the torque difference bigger. For that purpose, the drag force from the returning blade must be reduce by placing the circular cylinder as disturbance in front of the returning blade with the distance variation between the cylinder to returning blade.

In order to increasing performance of the Savonius wind turbine has diameter (D) of 101,6 mm and height (h) of 300 mm. The circular cylinder has diameter (d) of 101,6 mm and height (t) 500 mm, which located in front of returning blade of the the turbine. The circular cylinder is located in various spacing positions of (S/D) = 1,5, 1,6, 1,7, 1,8, 1,9, 2,0, 2,1, 2,2, 2,3 and 2,4. The wind is provided by a blower located 4 m from the wind turbine. The free stream velocity of the blower could be adjusted to 2,47 m/s, 4,95 m/s, 7,42 m/s, corresponding respectively to Reynold Number $Re = 3,0 \times 10^4$, $6,0 \times 10^4$ and $9,0 \times 10^4$ (based on equivalent length of $L = 2D - b$, where b is the width of overlap of

the two turbine blades and the free stream velocity). The free stream velocity is measured by Anemometer. The rotational speed of turbine is measured by Tachometer. The static torque is measured by Torquemeter. The dynamic torque is measured by Brake Dynamometer, and the power output of turbine is calculated by multiplying the dynamic torque and the rotation from the turbine.

The result of the experiment show that placing the circular cylinder is effective for improving the Savonius wind turbine performance. It is showed by the improvement from the rotational speed (n), static torque (T_{static}) and Coefficient of Performance (CoP) compared to the performance of Savonius wind turbine without placing a circular cylinder as disturbance. The maximum Coefficient of Power is obtained at $S/D = 1,6$ for $Re = 6,0 \times 10^4$ with the value of 25,05%. Maximum value of CoP is obtained at the value of TSR is 0,95. The rotational speed is obtained at $S/D = 1,6$ for $Re = 6,0 \times 10^4$ with the value of 472,63 rpm and the static torque is obtained with the value of 8,8 N-cm.

(Keywords : Savonius wind turbine, circular cylinder as a disturbance, coefficient of power)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas limpahan rahmat dan anugerah-Nya sehingga tugas ini telah terselesaikan. Tidak lupa penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

- 1) Bp. Nawazir dan Ibu Jainisnaini (alm) selaku orang tua saya serta Abrar Maulana dan Zaki Yahya, kedua adik penulis yang selalu memberikan doa dan dukungan yang tak terhingga.
- 2) Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktunya untuk membantu menyelesaikan tugas akhir ini
- 3) Seluruh punggawa Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin yang telah memberikan berbagai macam ilmu kepada saya.
- 4) Seluruh punggawa divisi hubungan luar LBMM, yang telah memberikan saya pengalaman hidup dan keorganisasian yang tidak akan terlupakan, khususnya ketika kepengurusan 2014/2015 yang merupakan masa yang sangat membanggakan.
- 5) Teman-teman Teknik Mesin ITS 2012 (M-55) yang telah menjalani kehidupan di kampus ini dari awal menjadi seorang mahasiswa
- 6) Teman-teman kos lelaki (kolak) yang telah memberikan warna dan keceriaan selama saya menjalani masa perkuliahan.
- 7) Teman-teman Kambing Tapanuli yang telah bermain futsal ceria selama menjalani kejenuhan di masa perkuliahan.

Penulis menyadari adanya kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini , oleh karena itu dibutuhkan adanya saran serta masukan.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR ISI

ABSTRAK..	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL..	xv
DAFTAR SIMBOL DAN SATUAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Turbin Angin.....	7
2.2 Turbin Angin Savonius	8
2.3 Gaya <i>Drag</i>	9
2.4 Perhitungan Torsi Statis	10
2.5 Reynolds <i>Number</i>	11
2.6 Perhitungan Daya.....	11
2.6.1 Perhitungan Daya Turbin Teoritis	11
2.6.2 Perhitungan Daya Aktual Turbin.....	12

2.6.3	<i>Coefficient of Power</i>	13
2.6.4	<i>Tip Speed Ratio</i>	14
2.7	Penelitian Terdahulu.....	14
2.7.1	Penelitian Silinder Berpengganggu	14
2.7.2	Penelitian Turbin Angin Savonius Berpengganggu .	18
2.8	<i>Blockage Effect</i>	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		23
3.1	Parameter Pengukuran.....	23
3.2	Analisa Dimensi	24
3.2.1	Analisa Dimensi untuk <i>Coefficient of Power</i>	24
3.3	Peralatan	27
3.3.1	<i>Blower</i>	27
3.3.2	Benda Uji.....	28
3.3.3	Penyangga Turbin Angin Savonius	29
3.3.4	Alat Ukur.....	30
3.4	Prosedur Penelitian.....	35
3.5	Flowchart Pengambilan Data	36
3.6	Urutan Langkah Penelitian.....	38
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN		39
4.1	Data Penelitian	39
4.1.1	Perhitungan Reynolds <i>Number</i>	39
4.1.2	Perhitungan <i>Coefficient of Power</i>	40
4.1.3	Perhitungan <i>Tip Speed Ratio</i>	42

4.2	Analisis Performa Turbin Savonius Tanpa Pengganggu dengan Variasi Bilangan Reynolds $3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; dan $9,0 \times 10^4$	42
4.3	Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius	46
4.3.1	Putaran Turbin Angin Savonius dengan Pengganggu Berupa Silinder Sirkular	46
4.3.2	Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Benda pengganggu Berupa Silinder Sirkular	49
4.3.3	Torsi Statis sebagai Fungsi Sudut Buka-an Sudu pada Jarak $S/D = 1,6$	52
4.3.4	<i>Coefficient of Power</i> Turbin Savonius dengan Pengganggu Berupa Silinder Sirkular	53
4.3.5	<i>Coefficient of Power</i> sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) pada Jarak $S/D = 1,5 - 2,4$	58
4.4	Perbandingan hasil eksperimen terhadap penelitian sebelumnya	61
4.4.1	Penelitian Silinder Pengganggu	61
4.4.2	Penelitian turbin angin Savonius berpengganggu silinder sirkular.....	63
4.5	Simulasi aliran pada turbin angin Savonius.....	64
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		67
5.1	Kesimpulan	67
5.2	Saran	68
DAFTAR PUSTAKA.....		69
LAMPIRAN		71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Turbin angin Savonius (Ahmad, 2012)	8
Gambar 2.2 Faktor daya sebagai fungsi TSR berbagai jenis Turbin (Al-Shemmeri, 2010)	14
Gambar 2.3 Skema percobaan (Igarashi, 1981)	15
Gambar 2.4 Visualisasi aliran yang melewati silinder pengganggu (Igarashi, 1981)	16
Gambar 2.5 Koefisien <i>drag</i> pada kedua silinder (Igarashi, 1981)	16
Gambar 2.6 Visualisasi aliran dengan menggunakan metode <i>smoke wind tunnel</i> (Igarashi, 1981)	17
Gambar 2.7 Skema konfigurasi penelitian (Altan et al, 2008) ...	18
Gambar 2.8 Grafik pengaruh plat penghalang terhadap nilai C_p dengan variasi <i>tip speed ratio</i> (Altan et al, 2008) ..	19
Gambar 2.9 Skema alat penelitian optimasi kinerja turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu dengan jarak tertentu (Tegar, 2016)	19
Gambar 2.10 Grafik perbandingan <i>coefficient of power</i> antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu (CoP/CoP_0) sebagai fungsi jarak pada $S/D = 1,5 - 2,4$ (Tegar, 2016)	20
Gambar 3.1 Skema penelitian (pandangan atas)	23
Gambar 3.2 Blower CKE SPV-19	27
Gambar 3.3 Skema penelitian dan dimensi alat	28
Gambar 3.4 Turbin angin Savonius	29
Gambar 3.5 Penyangga turbin angin Savonius	29

Gambar 3.6 Skema pengukuran <i>brake</i> dynamometer.....	30
Gambar 3.7 Timbangan Shimadzu ELB300.....	32
Gambar 3.8 Tachometer OMEGA seri HHT12.....	32
Gambar 3.9 Anemometer	33
Gambar 3.10 Torque meter LUTRON model TQ-8800.....	33
Gambar 3.11 Flowchart pengambilan data.....	36
Gambar 4.1 Grafik putaran turbin tanpa silinder pengganggu (n_0) fungsi Reynolds <i>Number</i>	43
Gambar 4.2 Grafik torsi statis turbin tanpa silinder pengganggu (T_{Statis0}) fungsi Reynolds <i>Number</i>	44
Gambar 4.3 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin tanpa silinder pengganggu (CoP_0) fungsi Reynolds <i>Number</i>	45
Gambar 4.4 Grafik putaran turbin (n) terhadap variasi S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$	47
Gambar 4.5 Grafik fungsi n/n_0 terhadap variasi besar S/D pada Re $= 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$	48
Gambar 4.6 Grafik T_{Statis} turbin terhadap variasi S/D pada $Re =$ $3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$	50
Gambar 4.7 Grafik fungsi $T_{\text{Statis}}/T_{\text{Statis0}}$ terhadap variasi besar S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$	51
Gambar 4.8 Grafik T_{statis} turbin berpengganggu sebagai fungsi sudut (Θ) pada jarak S/D = 1,6	53
Gambar 4.9 Grafik CoP terhadap variasi S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$	54
Gambar 4.10 Grafik fungsi CoP terhadap variasi besar Reynolds <i>Number</i> pada S/D = 1,6.....	55
Gambar 4.11 Grafik fungsi CoP/CoP_0 terhadap variasi besar S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$	57

Gambar 4.12 Grafik <i>Coefficient of Power</i> fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> dan S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$	58
Gambar 4.13 Simulasi tekanan aliran yang melewati turbin angin Savonius tanpa pengganggu pada $Re = 6,0 \times 10^4$..	64
Gambar 4.14 Simulasi tekanan aliran yang melewati turbin angin Savonius berpengganggu dengan variasi jarak $S/D=1,6$ pada $Re = 6,0 \times 10^4$	65
Gambar A.1 Grafik keseragaman aliran pada jarak 4 m	72

Halaman ini sengaja dikosongkan.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Turbin angin Savonius (Ahmad, 2012)	8
Gambar 2.2 Faktor daya sebagai fungsi TSR berbagai jenis Turbin (Al-Shemmeri, 2010)	14
Gambar 2.3 Skema percobaan (Igarashi, 1981)	15
Gambar 2.4 Visualisasi aliran yang melewati silinder pengganggu (Igarashi, 1981)	16
Gambar 2.5 Koefisien <i>drag</i> pada kedua silinder (Igarashi, 1981)	16
Gambar 2.6 Visualisasi aliran dengan menggunakan metode <i>smoke wind tunnel</i> (Igarashi, 1981)	17
Gambar 2.7 Skema konfigurasi penelitian (Altan et al, 2008) ...	18
Gambar 2.8 Grafik pengaruh plat penghalang terhadap nilai C_p dengan variasi <i>tip speed ratio</i> (Altan et al, 2008) ..	19
Gambar 2.9 Skema alat penelitian optimasi kinerja turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu dengan jarak tertentu (Tegar, 2016)	19
Gambar 2.10 Grafik perbandingan <i>coefficient of power</i> antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu (CoP/CoP_0) sebagai fungsi jarak pada $S/D = 1,5 - 2,4$ (Tegar, 2016)	20
Gambar 3.1 Skema penelitian (pandangan atas)	23
Gambar 3.2 Blower CKE SPV-19	27
Gambar 3.3 Skema penelitian dan dimensi alat	28
Gambar 3.4 Turbin angin Savonius	29
Gambar 3.5 Penyangga turbin angin Savonius	29

Gambar 3.6 Skema pengukuran <i>brake</i> dynamometer.....	30
Gambar 3.7 Timbangan Shimadzu ELB300.....	32
Gambar 3.8 Tachometer OMEGA seri HHT12.....	32
Gambar 3.9 Anemometer	33
Gambar 3.10 Torque meter LUTRON model TQ-8800.....	33
Gambar 3.11 Flowchart pengambilan data.....	36
Gambar 4.1 Grafik putaran turbin tanpa silinder pengganggu (n_0) fungsi Reynolds <i>Number</i>	43
Gambar 4.2 Grafik torsi statis turbin tanpa silinder pengganggu (T_{Statis0}) fungsi Reynolds <i>Number</i>	44
Gambar 4.3 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin tanpa silinder pengganggu (CoP_0) fungsi Reynolds <i>Number</i>	45
Gambar 4.4 Grafik putaran turbin (n) terhadap variasi S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4; 6,0 \times 10^4; 9,0 \times 10^4$	47
Gambar 4.5 Grafik fungsi n/n_0 terhadap variasi besar S/D pada Re $= 3,0 \times 10^4; 6,0 \times 10^4; 9,0 \times 10^4$	48
Gambar 4.6 Grafik T_{Statis} turbin terhadap variasi S/D pada $Re =$ $3,0 \times 10^4; 6,0 \times 10^4; 9,0 \times 10^4$	50
Gambar 4.7 Grafik fungsi $T_{\text{Statis}}/T_{\text{Statis0}}$ terhadap variasi besar S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4; 6,0 \times 10^4; 9,0 \times 10^4$	51
Gambar 4.8 Grafik T_{statis} turbin berpengganggu sebagai fungsi sudut (Θ) pada jarak S/D = 1,6	53
Gambar 4.9 Grafik CoP terhadap variasi S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4;$ $6,0 \times 10^4; 9,0 \times 10^4$	54
Gambar 4.10 Grafik fungsi CoP terhadap variasi besar Reynolds <i>Number</i> pada S/D = 1,6.....	55
Gambar 4.11 Grafik fungsi CoP/CoP_0 terhadap variasi besar S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4; 6,0 \times 10^4; 9,0 \times 10^4$	57

Gambar 4.12 Grafik <i>Coefficient of Power</i> fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> dan S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$	58
Gambar 4.13 Simulasi tekanan aliran yang melewati turbin angin Savonius tanpa pengganggu pada $Re = 6,0 \times 10^4$..	64
Gambar 4.14 Simulasi tekanan aliran yang melewati turbin angin Savonius berpengganggu dengan variasi jarak $S/D=1,6$ pada $Re = 6,0 \times 10^4$	65
Gambar A.1 Grafik keseragaman aliran pada jarak 4 m	72

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai CD dari beberapa bentuk penampang pada $Re \geq 1000$ (Fox, 2011).....	10
Tabel 2.2 Konfigurasi panjang plat penghalang (Altan et al, 2008)	18
Tabel 3.1 Spesifikasi <i>Blower</i> CKE SPV-19	28
Tabel 3.2 Spesifikasi pegas	31
Tabel 3.3 Spesifikasi benang nilon optimum	31
Tabel 3.4 Spesifikasi timbangan Shimadzu ELB300	31
Tabel 3.5 Spesifikasi Tachometer OMEGA seri HHT12.....	32
Tabel 3.6 Spesifikasi OMEGA HHF92A Digital Anemometer .	33
Tabel 3.7 Spesifikasi OMEGA HHF92A Digital Anemometer .	33
Tabel 3.8 Spesifikasi OMEGA HHF92A Digital Anemometer .	34
Tabel 3.9 Spesifikasi Torque meter LUTRON mode TQ-8800 .	34
Tabel 3.10 <i>Table planner</i> Penelitian	38
Tabel A.1 Data kecepatan angin pada jarak 4m	72
Tabel A.2 Data Putaran Turbin Savonius dengan Penambahan Konfigurasi Silinder Pengganggu	73
Tabel A.3 Data Torsi Statis Turbin Savonius dengan Penambahan Konfigurasi Silinder Pengganggu	74
Tabel A.4 Data <i>Coefficient of Power</i> Turbin Savonius dengan Penambahan Konfigurasi Silinder Pengganggu	75
Table A.5 Data <i>Coefficient of Power</i> dan <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) pada $Re = 3,0 \times 10^4$ dengan Variasi Jarak S/D	68
Table A.6 Data <i>Coefficient of Power</i> dan <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) pada $Re = 6,0 \times 10^4$ dengan Variasi Jarak S/D	69

Table A.7 Data *Coefficient of Power* dan *Tip Speed Ratio*(λ) pada
Re = $9,0 \times 10^4$ dengan Variasi Jarak S/D 70

Table A.8 Data *Coefficient of Power* dan *Tip Speed Ratio* (λ)
Pada S/D = 1,6 dengan Variasi Reynolds *Number*... 71

DAFTAR SIMBOL DAN SATUAN

D	diameter sudu turbin Savonius (m)
H	tinggi turbin Savonius (m)
A	luas permukaan turbin yang ditabrak oleh angin (m^2)
d	diameter silinder sirkular pengganggu (m)
t	panjang silinder sirkular pengganggu (m)
b	diameter <i>overlap</i> (m)
S	jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat <i>returning blade</i> (m)
L	panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran (m)
R	jari jari turbin (m)
C_D	koefisien <i>drag</i>
F_D	gaya <i>drag</i> (N)
P_W	daya angin(Watt)
P_T	daya aktual turbin(Watt)
CoP	<i>Coefficient of Power</i>
n	putaran poros turbin (rpm)
T	torsi dinamis turbin (N.m)
F	gaya yang bekerja pada poros turbin (N)
m	massa pemberat (kg)
s	pegas yang terbaca (kg)
g	akselerasi gravitasi (m/s^2)
Re	Reynolds <i>Number</i>
V	Kecepatan <i>free stream</i> (m/s)
ρ	Densitas fluida (kg/m^3)
μ	viskositas fluida (Ns/m^2)
Re	bilangan Reynolds
\dot{m}	laju aliran massa (kg/s)
TSR	<i>tip speed ratio</i>
ω	kecepatan angular turbin angin Savonius (rad/s)

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki tingkat populasi penduduk terbesar di dunia. Jumlah penduduk Indonesia diperkirakan meningkat dari sebanyak 238,5 juta penduduk pada tahun 2010 menjadi 305,6 juta penduduk pada tahun 2035 (BPS,2015). Dengan meningkatnya jumlah penduduk di Indonesia, maka akan membuat kebutuhan energi khususnya energi listrik di Indonesia semakin besar. Dalam rentang waktu tahun 2003-2013, total pembangkit listrik di Indonesia mengalami kenaikan rata-rata sebesar 7,3% per tahun. Dengan laju pertumbuhan pada PLTG sebesar 10% per tahun, dan laju pertumbuhan PLTU sebesar 9,3 % per tahun. Penggunaan PLTU merupakan yang terbesar yaitu 46,7% disusul PLTGU, PLTD masing-masing sebesar 19,3% dan 11,6 %. Pada pembangkit berbasis Energi Baru dan Terbarukan (EBT) masih cukup rendah, yaitu PLTA sebesar 9,9 %, PLTP sebesar 2,6% dan EBT lainnya masih di bawah 0,5 %. Rendahnya penggunaan EBT sangat disayangkan dikarenakan potensinya yang sangat besar. Total potensi sumber daya EBT dapat dijelaskan dengan rincian potensi panas bumi Indonesia mencapai 28.910 MW, potensi tenaga hidro di Indonesia yang tersedia saat ini mencapai 75.000 MW, potensi energi surya sebesar 4,8 KWh/M²/day, energi angin sebesar 3-6 m/s, energi laut sebesar 49 GW dan potensi listrik dari uranium sebesar 3.000 MW (ESDM,2014).

Pemanfaatan energi terbarukan, khususnya pada energi angin masih sangat rendah dikarenakan biaya dan efisiensi dalam pemanfaatan sumber energi angin yang masih rendah. Padahal, berdasarkan hasil pemetaan dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), kecepatan angin di Indonesia berkisar antara 3-6 m/s. Pada rentang kecepatan angin tersebut, pemanfaatan turbin angin Savonius sangat sesuai diterapkan untuk meningkatkan penggunaan energi terbarukan.

Turbin angin Savonius atau biasa disebut S-rotor ditemukan dan dipatenkan oleh Sigurd J. Savonius tahun 1931. Terdiri dari 2 silinder yang terbagi 2 bagian, yang menyelubungi permukaan poros dan membentuk seperti huruf S. Turbin angin Savonius merupakan turbin jenis VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*). Jenis lain dari turbin angin Savonius adalah turbin Daerius. Turbin angin Savonius memiliki banyak keunggulan dibandingkan turbin angin lainnya, yaitu biaya pembuatan dan *maintenance* yang murah, proses konstruksi yang mudah dan optimum digunakan pada kondisi angin yang berkecepatan rendah. Akan tetapi, turbin angin Savonius memiliki efisiensi aerodinamis yang rendah. Hal ini dikarenakan turbin angin Savonius adalah jenis turbin angin yang dapat menghasilkan daya dengan memanfaatkan gaya *drag* yang dihasilkan oleh setiap sudu turbin. Sudu turbin angin Savonius dibedakan menjadi 2 jenis yaitu *Advancing Blade* dan *Returning Blade*. Perbedaan gaya *drag* yang dihasilkan pada masing-masing sudu akan menghasilkan torsi. Apabila selisih gaya *drag* semakin besar, maka daya yang dihasilkan oleh turbin akan semakin besar. Salah satu cara untuk memperbesar selisih gaya *drag* dengan mengurangi gaya *drag* pada *Returning Blade*.

Terdapat beberapa penelitian yang sudah dilakukan terkait dengan reduksi gaya *drag* dan pemberian pengganggu pada turbin angin Savonius. Pada penelitian Igarashi (1981) dengan meletakkan silinder sirkuler pengganggu yang memiliki ukuran yang sama dengan silinder utama ($d/D = 1$), dengan memvariasikan jarak antara kedua pusat silinder (L/D) dan Reynolds Number. Pada penelitian ini, *quasi-stationary vortices* terbentuk diantara kedua silinder yang mempengaruhi karakteristik aliran yang melewati silinder.

Pada penelitian berkaitan dengan meningkatkan performa turbin juga telah diteliti oleh berbagai peneliti dari tahun 1977 hingga sekarang untuk menemukan desain optimum dari turbin. Altan et al (2008) melakukan penelitian pada turbin angin Savonius dengan memberi pengganggu berupa dua buah plat yang

diletakkan pada bagian depan turbin dengan variasi panjang plat dan besar sudut plat dengan kecepatan angin sebesar 7 m/s dan bilangan Reynolds $1,5 \times 10^5$. Didapatkan bahwa nilai *coefficient of power* (CP) dari turbin angin Savonius dapat meningkat hingga 38,5% apabila dibandingkan dengan turbin angin Savonius yang tidak memiliki penghalang pada bagian depan turbin.

Pada penelitian lainnya yang dilakukan Tegar (2016) tentang optimalisasi daya *output* turbin angin Savonius dengan menggunakan pengganggu berupa silinder dengan ukuran dimensi diameter 60 mm, panjang 280 mm, dan jarak dari pusat returning blade turbin angin (S/D) = $1,6 \leq S/D \leq 2,5$. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan wind tunnel dengan jenis subsonic, open circuit. Hasil dari penelitian ini dirasa masih kurang valid, karena perbandingan antara luasan turbin angin dengan wind tunnel terlalu besar, sehingga diperkirakan efek dari *blockage* pada aliran *freestream* di wind tunnel semakin besar. Untuk itu diperlukan penelitian lanjutan dengan mengurangi efek *blockage* dari permukaan yang mengelilingi turbin.

1.2 Perumusan Masalah

Pada penelitian ini akan menggunakan turbin angin Savonius, yang memiliki dua sudu turbin yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. *Advancing blade* berbentuk cekung dan *returning blade* berbentuk cembung apabila dilihat dari arah aliran udara yang datang ke arah turbin Savonius. Kedua sudu tersebut memiliki gaya *drag* yang timbul karena adanya aliran udara yang menabrak kedua sudu. Gaya *drag* yang diterima oleh masing-masing sudu memiliki nilai yang berbeda dimana gaya *drag* yang terbesar diterima oleh *advancing blade* sehingga menyebabkan turbin Savonius berputar terhadap porosnya. Selisih gaya *drag* tersebut apabila dikalikan dengan panjang lengan pada turbin akan menghasilkan torsi. Apabila torsi dikalikan dengan kecepatan putaran turbin akan menghasilkan daya *output* dari turbin. Sehingga apabila perbedaan gaya *drag* pada kedua sudu turbin

tersebut semakin besar, akan menghasilkan daya *output* turbin yang semakin besar juga.

Pada berbagai penelitian telah didapatkan berbagai cara untuk meningkatkan daya *output* dari turbin angin Savonius. Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi tersebut dengan meletakkan benda pengganggu berupa silinder sirkular di depan *returning blade* dengan variasi jarak (S/D). Hipotesa awal dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Silinder pengganggu diletakkan di depan *returning blade*. Penambahan silinder pengganggu menyebabkan penurunan gaya drag yang terdapat pada bagian *returning blade*. Hal ini dikarenakan daerah *wake* yang terjadi dibelakang silinder pengganggu diduga mempercepat pertumbuhan *boundary layer* menjadi turbulen pada *returning blade*. Akibatnya titik separasi mundur ke belakang dan gaya *drag* menurun.
2. Silinder pengganggu memiliki diameter yang sama besarnya dengan diameter turbin angin Savonius ($d/D = 1$). Dengan ukuran diameter yang sama, penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius menyebabkan terbentuknya *quasi-stationary vortices* sehingga tekanan di depan silinder pengganggu menjadi lebih kecil dibandingkan pada daerah di belakang *returning blade*. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* bernilai negatif pada bagian *returning blade* sehingga turbin angin Savonius dapat berputar lebih cepat.
3. Variasi jarak antara pusat *returning blade* turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (S/D) memiliki pengaruh untuk mengurangi gaya *drag* (F_D) yang terjadi pada bagian *returning blade*. Apabila jarak S/D yang digunakan semakin kecil, gaya *drag* tidak dipengaruhi oleh silinder pengganggu pada sisi *downstream* karena silinder pengganggu dan *returning blade* turbin angin Savonius dianggap sebagai satu

benda. Apabila jarak S/D semakin besar, maka silinder pengganggu sudah tidak efektif lagi mempengaruhi *returning blade*, keduanya seperti 2 buah silinder yang berdiri sendiri-sendiri, tidak saling mempengaruhi sehingga masing-masing mempunyai karakteristik yang sama.

Untuk membuktikan hipotesa diatas, maka akan dilakukan penelitian dengan menggunakan turbin angin Savonius dengan diameter (D) = 101.6 mm serta silinder pengganggu dengan diameter (d) = 101,6 mm serta silinder pengganggu dengan diameter (d) = 101,6 mm. Jarak antara pusat *returning blade* turbin angin Savonius dan silinder pengganggu (S/D) adalah $1,5 \leq S/D \leq 2,4$ dengan *Reynolds Number* = $3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$ dan $9,0 \times 10^4$.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk meningkatkan kinerja turbin angin Savonius dengan cara menempatkan silinder pengganggu dengan ukuran $d/D=1$ di depan *returning blade* menggunakan variasi jarak (S/D) yaitu $1,5 \leq S/D \leq 2,4$ dengan *Reynolds Number* = $3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$ dan $9,0 \times 10^4$, dengan cara mengukur:

1. Torsi statis turbin angin Savonius.
2. Torsi dinamis dan putaran turbin angin Savonius.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Fluida yang mengalir adalah udara yang memiliki karakteristik *steady flow*, *incompressible flow*, serta *uniform* pada sisi *upstream*, dengan *Reynolds Number* = $3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$ dan $9,0 \times 10^4$.
2. Analisa arah aliran yang dilakukan yaitu aliran dua dimensi.
3. Analisa dilakukan pada bagian *returning blade* turbin angin Savonius dengan diameter (D) = 101.6 mm dan pengganggu berupa silinder sirkular dengan perbandingan $d/D = 1$ ($d = 101.6$ mm).

4. Variasi jarak pusat *returning blade* turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (S/D) yang digunakan sebesar $1,5 \leq S/D \leq 2,4$.
5. Perpindahan panas dapat diabaikan.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan referensi rancangan turbin angin Savonius yang lebih efisien agar dapat diterapkan sebagai salah satu sumber daya pembangkit berbasis Energi Baru dan Terbarukan (EBT) di Indonesia.
2. Memberi kontribusi pada pengembangan pembangkit berbasis Energi Baru dan Terbarukan (EBT) khususnya energi angin di Indonesia.
3. Mengetahui spesifikasi yang tepat dengan variasi yang dilakukan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Angin

Angin telah lama menjadi sumber energi pada kehidupan manusia. Aplikasi dari penggunaan energi angin tersebut dengan menggunakan kincir angin atau turbin angin. Aplikasi penggunaan energi angin untuk digunakan sebagai pembangkit listrik dimulai pada sekitar tahun 1970. Adanya krisis minyak pada tahun 1972 mendorong negara-negara di Eropa untuk lebih mengembangkan berbagai energi yang dapat diperbaharui. Hingga pada saat sekarang, banyak negara di wilayah Eropa dan Amerika Utara telah memanfaatkan energi angin sebagai salah satu pembangkit listrik.

Prinsip kerja dari turbin angin dengan memanfaatkan gaya *drag* atau gaya *lift* yang timbul ketika terjadi kontak antara aliran angin dengan sudu-sudu pada turbin yang menyebabkan putaran pada poros turbin. Putaran pada poros tersebut kemudian dapat digunakan untuk memutar generator yang terhubung poros turbin untuk menghasilkan energi listrik. Turbin-turbin tersebut dapat dikelompokkan ke dalam 2 jenis sesuai dengan arah sumbu pada poros yang bekerja, yaitu *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT).

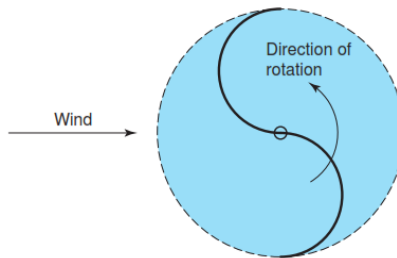
Kerja dari *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) sangat bergantung dari arah angin yang ada. Pada umumnya, turbin ini menggunakan 3 buah sudu atau biasa disebut *propeller turbine* karena bentuknya yang menyerupai dari *propeller* dari sebuah pesawat terbang. Jumlah dari sudu tersebut dapat bertambah atau berkurang, tetapi menurut berbagai penelitian menyebutkan bahwa turbin dengan 3 sudu memiliki efisiensi yang paling baik. Prinsip kerja dari turbin ini adalah dengan memanfaatkan aliran angin yang datang secara horizontal menuju arah turbin dan memutar sudu-sudu pada turbin. Kelebihan dari tipe turbin ini yaitu memiliki tingkat efektivitas yang tinggi dalam mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik. Namun kekurangan dari tipe turbin ini yaitu dibutuhkan biaya instalasi yang lebih mahal dalam membangun menara, panjang sudu turbin, serta dibutuhkan

penyangga yang kokoh untuk meletakkan gearbox, sudu dan generator.

Sedangkan pada *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) merupakan turbin angin yang memiliki poros yang berada tegak lurus terhadap arah aliran angin. Jenis turbin ini terdiri atas beberapa tipe, yaitu Savonius dan Darrieus. Kelebihan dari tipe turbin ini yaitu memiliki nilai torsi yang tinggi sehingga turbin lebih mudah dalam berputar pada kecepatan angin yang rendah, biaya konstruksi yang lebih ekonomis dan *maintenance* yang lebih mudah. Kekurangan dari tipe turbin ini yaitu turbin ini hanya menghasilkan daya yang rendah dan memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan jenis turbin HAWT..

2.2 Turbin Angin Savonius

Turbin angin tipe Savonius dikenalkan untuk pertama kali pada tahun 1922 oleh insinyur Finlandia Sigurd J. Savonius. Turbin tersebut merupakan turbin jenis VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*) yang terdiri dari dua sudu berbentuk setengah silinder (atau elips) yang disusun sehingga membentuk seperti huruf 'S' ketika dilihat dari atas.



Gambar 2.1 Turbin angin Savonius (Ahmad, 2012)

Berdasarkan prinsip aerodinamis, rotor turbin ini memanfaatkan gaya hambat (*drag*) saat mengekstrak energi angin dari aliran angin yang melalui sudu turbin. Sudu dari turbin Savonius (*Savonius Blade*) diklasifikasikan menjadi dua yaitu bagian *advancing blade* dan bagian *returning blade*.

Koefisien hambat permukaan cekung (*advancing blade*) lebih besar dari pada permukaan cembung (*returning blade*). Oleh karena itu, gaya *drag* yang diterima pada bagian *advancing blade* akan lebih besar dibandingkan dengan yang diterima pada bagian *returning blade* dan akan menyebabkan turbin berputar. Setiap turbin angin yang memanfaatkan potensi angin dengan gaya hambat memiliki efisiensi yang terbatas karena kecepatan sudu tidak dapat melebihi kecepatan angin yang melaluinya.

2.3 Gaya Drag

Setiap benda yang bergerak melalui sebuah fluida, akan mengalami suatu interaksi melalui tekanan dan tegangan geser. Gaya resultan dalam arah yang sama dengan kecepatan hulu disebut sebagai *drag* (gaya hambat), sedangkan gaya resultan yang tegak lurus terhadap arah kecepatan hulu disebut sebagai *lift* (gaya angkat). Gaya hambat (*drag*) seringkali ditunjukkan dengan koefisien *drag* (C_D) yaitu suatu bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk mengetahui gaya hambat. Secara umum, gaya hambat (F_D) dapat dituliskan seperti pada persamaan berikut:

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \quad (2.1)$$

dimana :

C_D : Koefisien *drag*

F_D : Gaya *Drag*

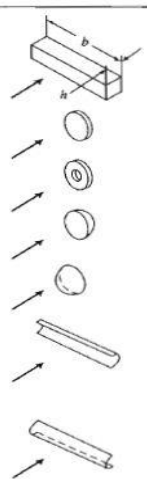
ρ : Densitas fluida

V : Kecepatan fluida

A : Luas permukaan turbin yang ditabrak oleh angin

Koefisien *drag* (C_D) memiliki nilai yang berbeda-beda, yang bergantung dari geometri yang dimiliki oleh benda tersebut. Nilai koefisien *drag* dari masing-masing geometri dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.1 Nilai C_D dari beberapa bentuk penampang pada $Re \geq 10^3$
(Fox, 2011)

Object	Diagram	$C_D (Re \geq 10^3)$
Square prism		$b/h = \infty$ 2.05
		$b/h = 1$ 1.05
Disk		1.17
Ring		1.20 ^b
Hemisphere (open end facing flow)		1.42
Hemisphere (open end facing downstream)		0.38
C-section (open side facing flow)		2.30
C-section (open side facing downstream)		1.20

Berbagai faktor menyebabkan suatu benda memiliki nilai gaya *drag* yang berbeda. Mulai dari dimensi, hingga profil dari suatu benda menyebabkan adanya perbedaan gaya *drag* yang timbul. Pada penelitian ini, sudu turbin yang digunakan memiliki 2 bentuk profil yang berbeda yang terdiri atas *advancing blade* dan *returning blade*. Secara teoritis, nilai C_D pada *advancing blade* memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan nilai C_D pada *returning blade*.

2.4 Perhitungan Torsi Statis

Torsi merupakan ukuran kuantitatif dari kecendrungan sebuah gaya untuk menyebabkan atau mengubah gerak rotasi dari suatu benda. Pada turbin, besar torsi bergantung pada kecepatan angin dan sudu turbin serta dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T = F_D \cdot R \quad (2.2)$$

Berdasarkan persamaan 2.1 dan 2.2 maka Torsi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$T = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot R \quad (2.3)$$

dimana :

T : Torsi yang dihasilkan dari putaran poros (N.m)

F_D : Gaya drag (N)

R : Jari-jari turbin (m)

2.5 Reynolds Number

Reynolds *Number* dapat diartikan sebagai suatu bilangan yang tidak memiliki dimensi dimana bilangan tersebut dapat menyatakan jenis-jenis aliran fluida. Aliran dapat dibedakan menjadi 2 jenis yaitu laminar dan turbulen. Untuk mengetahui jenis dari suatu aliran dapat digunakan rumusan untuk menghitung nilai dari *Reynolds Number* yaitu:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2.4)$$

dimana:

Re : Reynolds *Number*

ρ : Densitas fluida

V : Kecepatan fluida

L : Panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran, dalam hal ini merupakan diameter turbin (2D-b)

μ : Viskositas absolut fluida

2.6 Perhitungan Daya

Prinsip utama dari turbin angin adalah laju energi angin yang dapat dikonversikan oleh turbin menjadi energi mekanik. Energi mekanik yang didapatkan dikonversikan menjadi hitungan daya yang menjadi indikator performa dari turbin angin Savonius.

2.6.1 Perhitungan Daya Turbin Teoritis

Besarnya laju energi angin yang dapat dikonversikan menjadi energi mekanik oleh turbin angin secara teoritis dipengaruhi oleh energi kinetik yang dihasilkan oleh udara serta laju aliran massa dari udara. Besarnya energi kinetik dapat dihitung secara menggunakan rumus berikut:

$$Ek = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (2.5)$$

Massa udara yang bergerak dalam satuan waktu dengan kerapatan ρ , yaitu:

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A \quad (2.6)$$

Sehingga, besarnya daya yang dapat dihasilkan oleh angin yang berhembus dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V \times V^2$$

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (2.7)$$

Dengan:

Ek = energi kinetik (Joule)

P_w = daya angin (watt)

ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

A = luas penampang turbin (m^2)

V = kecepatan udara (m/s)

2.6.2 Perhitungan Daya Aktual Turbin

Pada perhitungan daya aktual turbin (P_T) pada perencanaannya akan diukur menggunakan *Brake* Dyamometer dimana alat tersebut menghitung besarnya torsi dinamis yang dihasilkan oleh aliran fluida pada turbin angin Savonius. Perhitungan daya aktual turbin (P_T) dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$P_T = T\omega \quad (2.8)$$

Dengan:

P_T = Daya aktual turbin (watt)

T = Torsi dinamis turbin yang dalam penelitian diukur dengan menggunakan *Brake* dynamometer (N-m)

ω = Kecepatan putaran turbin angin Savonius (rad/s).

Besarnya torsi yang dihasilkan oleh turbin angin dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$T = F r \quad (2.9)$$

Dengan:

r = radius *pulley* (m)

Gaya yang bekerja pada poros turbin dapat diukur dengan rumus berikut:

$$F = (m-s) g \quad (2.10)$$

Dengan:

m = massa pemberat (kg)
 s = pegas yang terbaca (kg)
 g = akselerasi gravitasi (m/s^2)

Kecepatan putaran turbin angin Savonius dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.11)$$

Dengan:

n = Gerak rotasi poros turbin angin Savonius (rpm)

Dengan menggunakan persamaan 2.9, 2.10 dan 2.11, maka didapatkan persamaan berikut:

$$P_T = \frac{(m-s)g r \pi n}{30} \quad (2.12)$$

2.6.3 *Coefficient of Power*

Coefficient of power (C_{op}) merupakan suatu perbandingan antara daya yang dihasilkan secara mekanik pada sudu oleh turbin angin terhadap daya yang dihasilkan oleh *drag force* yang dihasilkan oleh aliran udara. Persamaan *coefficient of power* (C_{op}) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{aligned} C_{op} &= \frac{P_T}{P_w} \\ C_{op} &= \frac{\frac{(m-s)g r \pi n}{30}}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \\ C_{op} &= \frac{(m-s)g r \pi n}{15 \rho A V^3} \end{aligned} \quad (2.13)$$

2.6.4 Tip Speed Ratio

Tip Speed Ratio (TSR) merupakan perbandingan antara kecepatan putar turbin terhadap kecepatan angin. TSR dilambangkan dengan λ .

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_w} \quad (2.14)$$

Dengan:

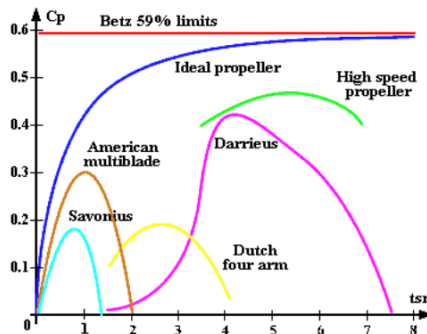
λ = *tip speed ratio*

ω = kecepatan angular turbin angin Savonius(rad/s)

R = jari-jari turbin (m)

V = kecepatan angin (m/s)

Karena setiap tipe turbin angin memiliki karakteristik yang berbeda-beda, maka faktor daya sebagai fungsi dari TSR juga berbeda sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 2.2 berikut:



Gambar 2.2 Faktor daya sebagai fungsi TSR berbagai jenis turbin (Al-Shemmeri, 2010)

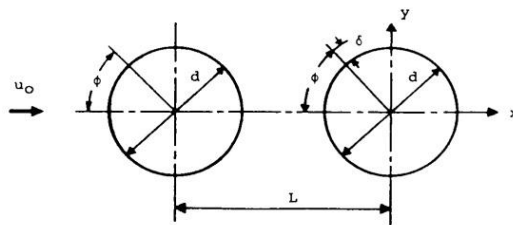
2.7 Penelitian Terdahulu

Dalam melakukan studi eksperimen ini, terdapat beberapa referensi dari berbagai penelitian terdahulu yang berkaitan dan menunjang penelitian yang akan dilakukan. Beberapa penelitian tersebut yang akan dijabarkan antara lain:

2.7.1 Penelitian Silinder Berpengganggu

Benda pengganggu sering digunakan untuk mengganggu karakteristik sebuah aliran. Pada penelitian **Igarashi** (1981)

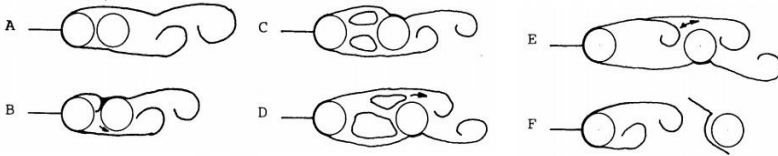
dengan meletakkan silinder sirkuler pengganggu yang memiliki ukuran yang sama dengan silinder utama ($d/D = 1$). Adapun variasi yang dilakukan pada penelitian ini variasikan jarak antara kedua pusat silinder (L/D) dan perubahan *Reynolds Number* pada rentang $8,7 \times 10^3 \leq Re \leq 5,2 \times 10^4$. Pada penelitian ini, terbentuk beberapa vortex diantara kedua silinder yang mempengaruhi karakteristik aliran yang melewati silinder. Berikut skema penelitian yang dilakukan seperti pada gambar 2.3



Gambar 2.3 Skema percobaan (Igarashi, 1981)

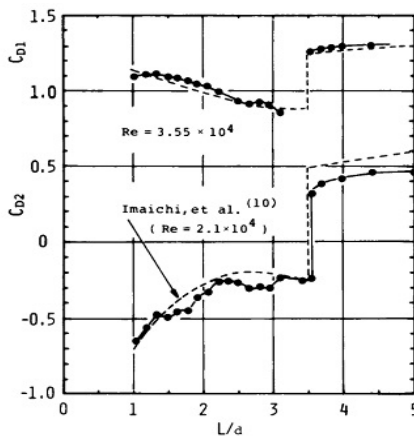
Pada Gambar 2.4 merupakan visualisasi aliran yang melewati silinder pengganggu. Pada bagian A dengan variasi jarak tertentu, separasi yang terjadi pada *boundary layer* pada sisi *upstream* dan *downstream* silinder, namun tidak terdapat pembentukan *vortex* pada variasi jarak A. Pada bagian B dengan variasi jarak tertentu, terdapat pembentukan *vortex*. Namun frekuensi pembentukkan *vortex* tidak terlalu memiliki pengaruh pada karakteristik aliran sehingga kecepatan pada *section* tersebut hampir tidak memiliki pengaruh terhadap kecepatan aliran *freestream*. Pada bagian C dengan variasi jarak tertentu, terbentuk *vortices* tergolong kedalam bentuk *Quasi-stationary vortices* diantara kedua silinder. Pada bagian D dengan variasi jarak tertentu, *Quasi-stationary vortex* menjadi tidak stabil yang menyebabkan terbentuknya suatu *vortex shedding* yang menyebabkan arah aliran fluida berubah menuju silinder utama pada sisi *downstream* silinder. Pada bagian E dengan variasi jarak tertentu, aliran sudah menunjukkan kestabilan dengan pola yang berkelanjutan. Pada bagian F dengan variasi jarak tertentu,

separasi pada *boundary layer* terjadi pada sisi *upstream* silinder atau di depan sisi *downstream* silinder.



Gambar 2.4 Visualisasi aliran yang melewati silinder pengganggu (Igarashi, 1981)

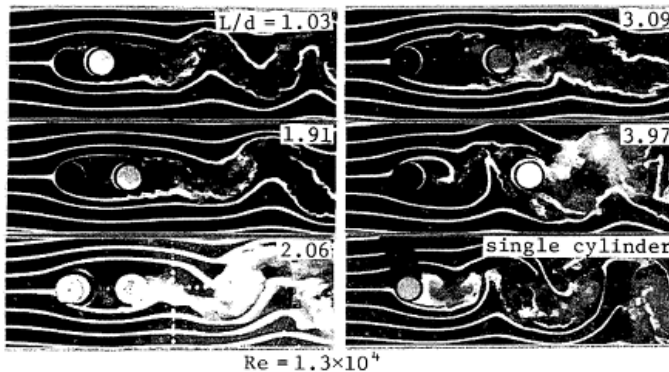
Koefisien *drag* dapat diketahui dari nilai distribusi tekanan yang didapatkan. Koefisien *drag* pada *upstream* silinder, C_{D1} mengalami penurunan nilai apabila variasi jarak L/d dinaikkan. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.5. Namun, pada jarak $L/d = 3,53 \leq L/d \leq 3,68$, nilai koefisien *drag* mengalami peningkatan nilai yang signifikan hingga 1,3. Koefisien *drag* pada *downstream* silinder, C_{D2} mengalami nilai apabila variasi jarak L/d dinaikkan. Nilai koefisien drag tersebut memiliki nilai terbesar pada variasi jarak $L/d = 2,5$. Pada variasi jarak kritisal $L/d \geq 3,53$, nilai koefisien drag meningkat secara signifikan hingga 0,45.



Gambar 2.5 Koefisien *drag* pada kedua silinder (Igarashi, 1981)

Pada gambar 2.6 merupakan visualisasi aliran yang melewati kedua silinder dengan metode *smoke wind tunnel* pada

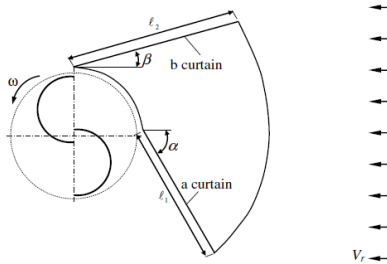
$Re = 1,3 \times 10^4$. Pada jarak $L/d = 1,03$, pola aliran yang melintasi kedua silinder seperti hanya melewati satu buah silinder saja. Namun pada jarak $1,18 \leq L/d \leq 1,91$, tidak terjadi proses *reattaching* pada *downstream cylinder* dari *shear layers* yang terseparasi pada *upstream cylinder*. Besarnya ukuran dari *wake* yang terbentuk akibat separasi aliran pada *downstream cylinder* terlihat lebih kecil jika dibandingkan dengan besarnya ukuran *wake* ketika hanya melewati satu buah silinder saja. Pada variasi jarak $L/d = 2,06$ dan $3,09$, terjadi proses *reattachment* pada *downstream cylinder* dari *shear layer* yang terseparasi dari *upstream cylinder*. Pada variasi jarak $L/d = 3,97$ merupakan fenomena yang disebut sebagai *jumped flow*. Fenomena ini menjelaskan bahwa pola aliran setelah melewati *upstream cylinder* hampir sama dengan pola aliran setelah melewati *downstream cylinder*. Hal ini mengindikasikan bahwa *upstream cylinder* sudah tidak terlalu mempengaruhi aliran yang akan melewati *downstream cylinder*.



Gambar 2.6 Visualisasi aliran dengan menggunakan metode *smoke* *wind tunnel* (Igarashi, 1981)

2.7.2 Penelitian Turbin Angin Savonius Berpengganggu

Pada Penelitian yang dilakukan oleh **B.D. Altan et al, 2008** dengan menggunakan konfigurasi alat yang digunakan yaitu sebuah plat penghalang yang diposisikan di depan *advancing blade* yang berfungsi sebagai penutup atau penyearah aliran. Adapun skema peralatan yang digunakan sesuai gambar 2.7. Variasi konfigurasi alat yang digunakan adalah panjang plat penghalang (ℓ_1) dan (ℓ_2) sesuai tabel 2.2 serta variasi besar sudut (α) dan (β). Sedangkan variasi data yang digunakan adalah *speed ratio* pada rentang 0 – 0,9.

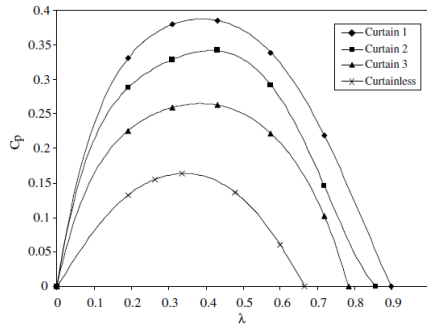


Gambar 2.7 Skema konfigurasi penelitian (Altan et al, 2008)

Tabel 2.2 Konfigurasi panjang plat penghalang (Altan et al, 2008)

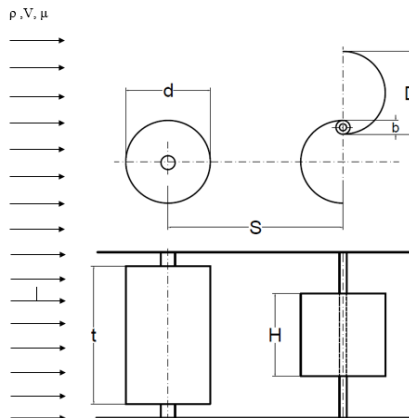
Type of curtain arrangement	Distance ℓ_1 (cm)	Distance ℓ_2 (cm)
Curtain 1	45	52
Curtain 2	34	39
Curtain 3	22	26

Konfigurasi optimal terdapat pada sudut (α) = 45° dan (β) = 15° melalui pengambilan data pada rentang sudut tertentu. Gambar 2.8 Grafik pengaruh konfigurasi plat penghalang terhadap nilai *power coefficient* (C_p) dengan variasi *speed ratio*. Dari data tersebut didapatkan adanya kenaikan nilai C_p akibat adanya plat penghalang. Nilai C_p optimum tanpa plat penghalang sebesar 0,16 sedangkan nilai C_p optimum dengan menggunakan plat penghalang didapatkan pada jenis konfigurasi plat penghalang 1 yaitu sebesar 0,385. Penggunaan konfigurasi alat dalam penelitian ini mampu meningkatkan *power coefficient* sebesar 38%.



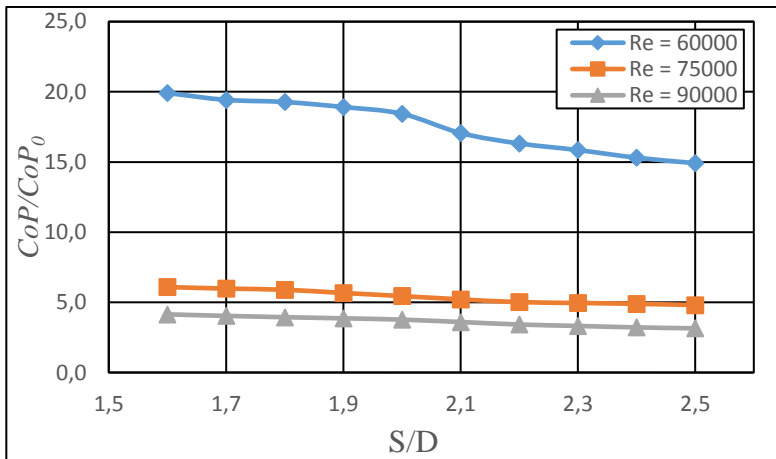
Gambar 2.8 Grafik pengaruh plat penghalang terhadap nilai C_p dengan variasi *speed ratio* (Altan et al, 2008)

Pada penelitian lainnya yang dilakukan Tegar (2016) tentang optimalisasi daya output dari turbin angin tipe Savonius dengan menggunakan pengganggu berupa silinder dengan ukuran dimensi diameter 60 mm, panjang 280 mm, dan jarak dari pusat *returning blade* turbin angin (S/D) = $1,6 \leq S/D \leq 2,5$. Pada penelitian ini, penggunaan silinder pengganggu sirkular yang diletakkan di depan *returning blade* turbin angin Savonius efektif dalam meningkatkan performa dari turbin angin Savonius.



Gambar 2.9 Skema alat penelitian optimasi kinerja turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu dengan jarak tertentu (Tegar, 2016).

Skema alat yang digunakan ditunjukkan pada gambar 2.9 dengan pusat dari susunan benda penghalang aliran diposisikan sejajar dengan pusat dari *returning blade* dengan jarak S/D tertentu. Pada penelitian ini, didapatkan jarak pusat *returning blade* turbin angin savonius dengan pusat silinder pengganggu yang efektif pada $S/D = 1,6$ untuk semua variasi *Reynolds number* yang ditandai dengan nilai puncak (*peak value*) dari putaran, torsi statis dan *coefficient of power* turbin Angin Savonius berpengganggu berada pada jarak S/D tersebut. Pada *Reynolds number* sebesar $6,0 \times 10^4$ didapatkan kenaikan maksimal dari nilai *coefficient of power* sebesar 19,91 Pada *reynolds number* sebesar $7,5 \times 10^4$ didapatkan kenaikan maksimal dari nilai *coefficient of power* sebesar 6,09 Sedangkan pada *Reynolds number* sebesar $9,0 \times 10^4$ didapatkan kenaikan maksimal dari nilai *coefficient of power* sebesar 4,14. Besarnya kenaikan dari *coefficient of power* dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Grafik perbandingan *coefficient of power* antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu (CoP/CoP_0) sebagai fungsi jarak pada $S/D = 1,5 - 2,4$ (Tegar, 2016)

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan wind tunnel dengan jenis subsonic, open circuit. Hasil dari penelitian ini

dirasa masih kurang valid, karena perbandingan antara luasan turbin angin dengan wind tunnel terlalu besar, sehingga diperkirakan efek dari *blockage* pada aliran *freestream* di wind tunnel semakin besar. Untuk itu diperlukan penelitian lanjutan dengan mengurangi efek *blockage* dari permukaan yang mengelilingi turbin.

2.8 *Blockage Effect*

Pada penelitian yang dilakukan oleh **Tegar [9]** memiliki perbandingan luasan konfigurasi turbin serta silinder pengganggu dengan luasan *test section* sebesar 18%. Menurut penelitian yang dilakukan oleh **Maskel (1965)**, rasio perbandingan antara luas dari *test section* dengan luas dari benda uji adalah maksimal 16 %. Sehingga, pada penelitian ini memiliki *blockage effect* sesuai dengan perbandingan luasan yang melebihi 16%. *Blockage effect* akan mengakibatkan nilai dari koefisien *drag* pada suatu benda uji akan meningkat. Hal ini berdasarkan pada persamaan berikut:

$$\frac{C_D}{C_{DC}} = 1 + \varepsilon \left(C_D \frac{S}{C} \right) + \left(\frac{S}{C} \right)^2 \quad (2.15)$$

Dengan:

C_D = Koefisien *drag* pada benda uji

C_{DC} = Faktor koreksi koefisien *drag*

S = Luasan benda uji (m^2)

C = Luasan *test section* (m^2)

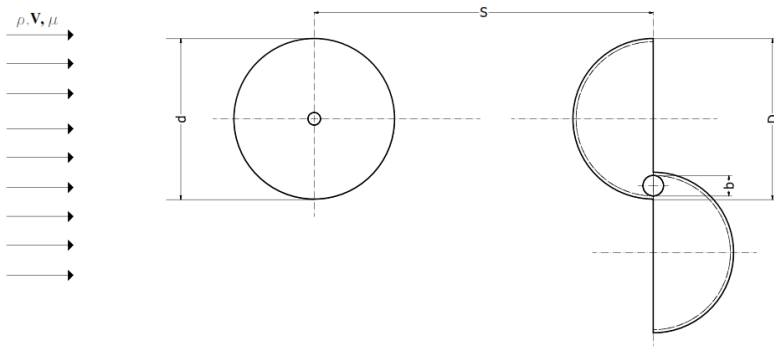
Dari persamaan 2.15 dapat dilihat bahwa dengan meningkatnya perbandingan antara luas dari benda uji dan luas dari *test section* ($\frac{S}{C}$), maka nilai koefisien *drag* dari benda uji akan semakin meningkat. Hal ini akan mengakibatkan selisih gaya *drag* yang terjadi pada kedua sudu akan meningkat sehingga peningkatan dari putaran, torsi dan *coefficient of power* yang dihasilkan oleh turbin semakin meningkat.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Parameter Pengukuran

Pada penelitian diperlukan adanya analisis dimensi untuk mengetahui parameter-parameter yang berpengaruh terhadap peningkatan *performance* turbin Savonius. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan jarak antara pusat *returning blade* turbin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (S) dan juga variasi kecepatan aliran (V) yang diatur melalui *reynolds number*, serta terdapat parameter-parameter lain yang mempengaruhi seperti massa jenis udara (ρ), viskositas udara (μ), diameter *returning blade* (sebagai silinder utama) (D), dan juga diameter silinder pengganggu (d). Pada gambar 3.1 dibawah dapat dilihat skema penelitian dan parameter yang akan dianalisis pada penelitian ini.



Gambar 3.1 Skema penelitian (pandangan atas)

1. ρ : massa jenis fluida udara (kg/m^3)
2. μ : viskositas udara (Ns/m)
3. V : kecepatan udara (m/s)
4. b : diameter overlap (m)
5. d : diameter silinder sirkular pengganggu (m)
6. D : diameter turbin (m)
7. S : jarak antar pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade* (m)

3.2 Analisa Dimensi

Analisa dimensi diperlukan dalam menentukan parameter-parameter yang memiliki pengaruh terhadap suatu aliran. Parameter-parameter yang mempengaruhi karakteristik aliran adalah densitas fluida (ρ), viskositas fluida (μ), kecepatan fluida (V), diameter silinder pengganggu (d), diameter turbin (D), jarak antara pusat *returning blade* turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (S/D), tinggi turbin (H), panjang silinder pengganggu (t), diameter *overlap* (b) dan putaran sudu turbin angin Savonius (n). Analisa dimensi digunakan pada penelitian ini untuk mengetahui variabel-variabel yang memiliki pengaruh terhadap karakteristik aliran yang melewati turbin angin Savonius dengan pengganggu berupa silinder sirkular. Cara yang digunakan adalah dengan *Buckingham-Phi Theorema*.

3.2.1 Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Power*

Langkah-langkah analisis dimensi yaitu sebagai berikut :

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *power*

$$P = f(\rho, \mu, V, D, d, S, H, t, b, n)$$

Jumlah parameter (n) = 11 parameter

Parameter-parameter tersebut adalah:

P = Power (J/s)

ρ = Massa jenis udara (kg/m^3)

μ = Viskositas udara (Ns/m^2)

V = Kecepatan aliran (m/s)

D = Diameter sudu turbin angin Savonius (m)

d = Diameter silinder pengganggu (m)

S = Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade* (m)

H = Tinggi turbin angin Savonius (m)

t = panjang silinder pengganggu (m)

b = Diameter *overlap* (m)

n = Putaran sudu turbin angin Savonius (rpm)

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam menganalisis.

Dipilih M, L, t.

3. Membuat dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih.

Parameter	P	ρ	μ	V	D	d	S	H	t	b	n
Dimensi	$\frac{M L^2}{t^3}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{L t}$	$\frac{L}{t}$	L	L	L	L	L	L	$\frac{1}{t}$

4. Memilih parameter berulang yang jumlahnya (m) sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan yaitu : ρ, U, D .

Jumlah parameter berulang (m) = r = 3.

5. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan.
Jumlah grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan = n-m = 11 - 3 = 8 grup tanpa dimensi.

$$\text{i. } \pi_1 = \rho^a V^b D^c P = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{M L^2}{t^3}\right) = (M^0 L^0 t^0)$$

dimana :

$$M : a + 1 = 0$$

$$L : -3a + b + c + 2 = 0$$

$$t : -b - 3 = 0$$

diperoleh :

$$a = -1 ; b = -3 ; c = -2$$

sehingga :

$$\pi_1 = \rho^{-1} V^{-3} D^{-2} P$$

atau

$$\pi_1 = \frac{P}{\rho V^3 D^2}$$

- ii. Dengan cara yang sama diperoleh:

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho V D}$$

$$\pi_3 = \frac{d}{D}$$

$$\begin{aligned}\pi_4 &= \frac{S}{D} \\ \pi_5 &= \frac{H}{D} \\ \pi_6 &= \frac{t}{D} \\ \pi_7 &= \frac{b}{D} \\ \pi_8 &= \frac{n D}{V}\end{aligned}$$

Dari analisis dimensi diatas diperoleh grup tak berdimensi sebagai berikut :

π_1 = *Coefficient of Power*

π_2 = bilangan Reynolds

π_3 = ratio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius

π_4 = ratio jarak antara pusat *returning blade* dengan silinder pengganggu

π_5 = ratio tinggi turbin angin Savonius dengan diameter turbin angin Savonius

π_6 = ratio panjang silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius

π_7 = ratio diameter *overlap* dengan diameter turbin angin Savonius

π_8 = *Tip Speed Ratio*

Hubungan antara grup tak berdimensi sebagai berikut :

$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8)$

$$\frac{P}{\rho V^3 D^2} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{H}{D}, \frac{t}{D}, \frac{b}{D}, \frac{n D}{V}\right)$$

Pada penelitian ini $\frac{d}{D}, \frac{H}{D}, \frac{t}{D}, \frac{b}{D}$ sebagai variabel tetap, sedangkan $\frac{S}{D}, \frac{\mu}{\rho V D}, \frac{n D}{V}$ divariasikan agar dapat

mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap *coefficient of power* pada turbin angin sehingga :

$$\frac{P}{\rho V^3 D^2} = f_2 \left(\frac{S}{D}, \frac{\mu}{\rho V D}, \frac{n D}{V} \right)$$

Dalam hal ini D sebanding dengan L, untuk $L = 2D$, maka

$$\frac{P}{\rho V^3 D^2} = f_3 \left(\frac{S}{D}, \frac{\mu}{\rho V L}, \frac{n D}{V} \right)$$

atau

$$C_{op} = f_4 \left(\frac{S}{D}, \text{Re, TSR} \right)$$

3.3 Peralatan

Pada penelitian ini digunakan beberapa peralatan untuk menunjang pengambilan data eksperimen.

3.3.1 *Blower*

Pada penelitian ini menggunakan *blower* untuk menghasilkan kecepatan angin yang akan digunakan dalam pengujian performa turbin angin Savonius. *Blower* yang digunakan yaitu **CKE SPV-19**. Untuk Spesifikasi yang lebih detail dapat dilihat pada Tabel 3.1

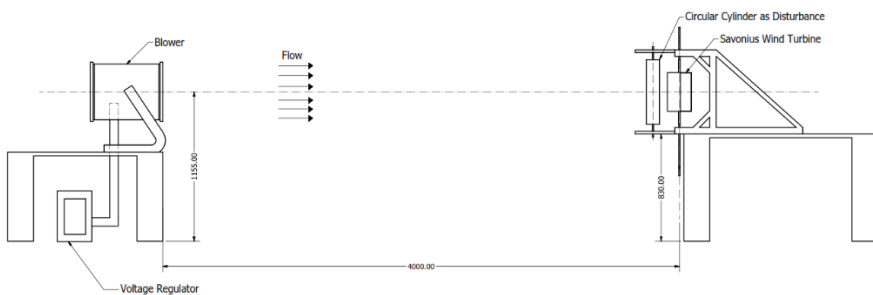


Gambar 3.2 *Blower* CKE SPV-19

Tabel 3.1 Spesifikasi *Blower* CKE SPV-19

SPECIFICATIONS	
Diameter	18 inch / 450 mm
Speed	2850 RPM
Air Flow	4413 CFM
Power	1700 Watt
Phase	1
Voltage	220 – 240 V

Skema penelitian yang dilakukan adalah dengan meletakkan *blower* sejauh 4 meter di depan turbin angin Savonius, yang dapat dilihat pada gambar 3.3

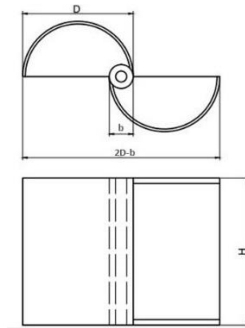
**Gambar 3.3** Skema penelitian dan dimensi alat

3.3.2. Benda Uji

Pada penelitian ini, sebagai benda kerja digunakan turbin angin tipe Savonius dengan pengganggu berupa plat datar.

a. Profil turbin angin tipe Savonius sebagai berikut :

- Diameter sudu turbin (D) : 101.6 mm
- Tinggi (H) : 300 mm
- Diameter turbin (2D-b) : 190.2 mm
- Overlap diameter (b) : 13 mm



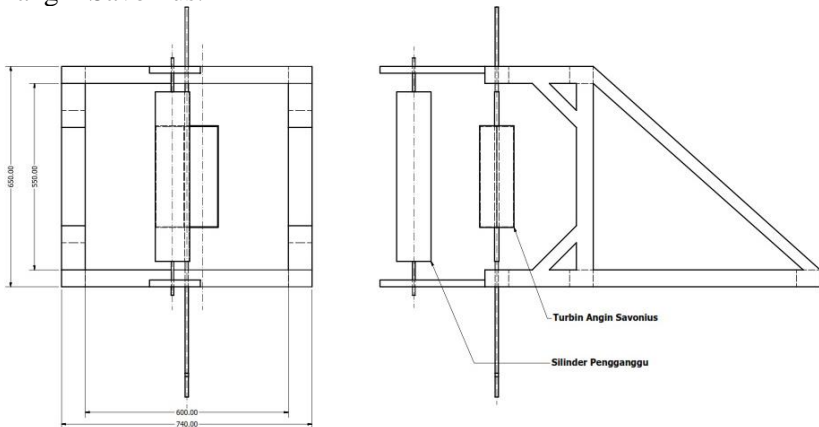
Gambar 3.4 Turbin angin Savonius

b. Profil silinder pengganggu sebagai berikut :

- Diameter (d) : 101.6 mm
- Panjang (t) : 500 mm
- Jarak dari pusat *returning blade* turbin angin
($S/D = 1.5 \leq S/D \leq 2,4$)

3.3.3 Penyangga Turbin Angin Savonius

Pada penelitian digunakan sebuah penyangga yang digunakan sebagai tempat peletakkan turbin angin Savonius dan juga silinder pengganggu. Berikut skema dari penyangga turbin angin Savonius:



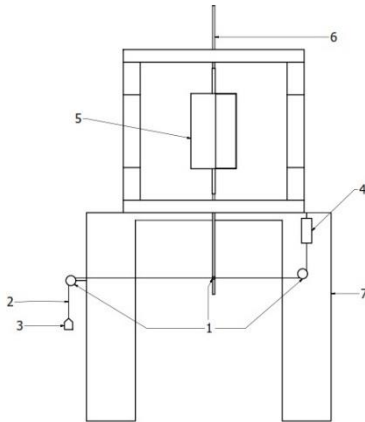
Gambar 3.5 Penyangga turbin angin Savonius

3.3.4 Alat Ukur

Pada penelitian ini digunakan beberapa alat ukur untuk mendapatkan nilai putaran (rpm) dan torsi (N.m) yang dihasilkan oleh turbin Savonius.

a. *Brake* Dynamometer

Brake dynamometer merupakan alat ukur digital yang berfungsi untuk mengukur torsi yang dihasilkan oleh putaran suatu objek. *Brake* dynamometer yang digunakan, dapat dilihat pada gambar 3.6 yang didasarkan dari penelitian yang dilakukan oleh Mahmoud et al (2010).



(a) Skema desain awal



(b) Foto dari skema *brake* dynamometer

Gambar 3.6 Skema pengukuran *brake* dynamometer

Keterangan:

1. Sistem *pulley*
2. Benang Nilon
3. Massa pemberat
4. Pegas
5. Turbin angin Savonius
6. Poros turbin angin Savonius
7. Struktur Penyanggah turbin angin Savonius

Pengukuran yang dilakukan adalah dengan skema yang terdiri dari sistem *pulley*, massa pemberat dan pegas yang dihubungkan oleh benang nilon dengan merk **Optimum** yang menyelubungi dari poros turbin angin Savonius. Besarnya daya yang terukur sesuai dengan persamaan 2.8, dimana torsi dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dapat diukur oleh *brake* dynamometer. Torsi dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius diukur ketika turbin berputar. Massa pemberat dengan jenis plat besi ditambahkan dengan berbagai variasi hingga turbin berhenti berputar, dengan berbagai nilai massa dari 1 gram, 2 gram, 5 gram, 10 gram, 25 gram, 50 gram dan 100 gram.

Tabel 3.2 Spesifikasi pegas

SPECIFICATIONS	
Range	0 to 5 N ; 0 to 500 g
Resolution	1 N ; 10 g

Tabel 3.3 Spesifikasi benang nilon optimum

SPECIFICATIONS	
Kekuatan	15 lbs ; 6,8 kg
Diameter	1 mm

Untuk mengukur besarnya massa pemberat, dilakukan dengan menggunakan timbangan. Timbangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah **Shimadzu ELB300**. Untuk spesifikasi yang lebih detail dapat dilihat pada tabel 3.4

Tabel 3.4 Spesifikasi timbangan Shimadzu ELB300

SPECIFICATIONS	
Weighing Capacity	300 g
Minimum Display	0,01 g
Standard deviation	0,01 g
Linearity errors	$\pm 0,01$ g
Pan size	\varnothing 110 mm



Gambar 3.7 Timbangan Shimadzu ELB300

b. Tachometer

Alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah objek. Tachometer yang digunakan, dapat dilihat pada gambar 3.8, yaitu pada penelitian ini yaitu *Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer OMEGA* seri HHT12 dengan akurasi pembacaan 0.01% atau ± 1 digit dengan range pengukuran antara 5 hingga 99.999 rpm. Untuk Spesifikasi yang lebih detail dapat dilihat pada Tabel 3.5



Gambar 3.8 Tachometer OMEGA seri HHT12

Tabel 3.5 Spesifikasi Tachometer OMEGA seri HHT12

SPECIFICATIONS	
Range	5 to 99.999 rpm
Accuracy	0,01 % of reading or ± 1 digit
Resolution	0,001 to 1,0 rpm
Display	5-digit alphanumeric LCD
Memory	Max, min and last
Power	2 "AA" 1,5 V dc batteries

c. Anemometer

Anemometer adalah sebuah perangkat yang digunakan untuk mengukur kecepatan dan temperatur angin. Anemometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah **Omega HHF92A Digital Anemometer**. Pengukuran dapat dilakukan dalam beberapa satuan pengukuran yaitu ft/min, mph, knots, meter/s dan km/h. Selain itu alat ini dapat mengukur temperatur udara dalam satuan °F dan °C. Untuk spesifikasi yang lebih detail dapat dilihat pada tabel 3.6, tabel 3.7 dan tabel 3.8



Gambar 3.9 Anemometer

Tabel 3.6 Spesifikasi Omega HHF92A Digital Anemometer

SPECIFICATIONS	
Fan Diameter	70 mm
Auto Power Off	20 min
Display	Dual 4-digit LCD
Display Size	37 x 42 mm (1-1/4 x 1-5/8"); 9999 max reading

Tabel 3.7 Spesifikasi Omega HHF92A Digital Anemometer

Air Flow	
Range	Resolution
80 to 6900 ft/m	1 ft/min
0.4 to 35 m/s	0.01 m/s

Tabel 3.8 Spesifikasi Omega HHF92A Digital Anemometer

Temperature	
Range	Resolution
-10 to 50 °C	0.1 °C
14 to 122 °F	0.1 °F

- d. Torque Meter
- Torque meter ini merupakan alat ukur digital yang berfungsi untuk mengukur torsi statis dari suatu poros. Torque meter yang digunakan yaitu **Torque meter LUTRON model : TQ-8800** dengan *high resolution* 0,1 Newton-cm.



Gambar 3.10 Torque meter LUTRON model TQ-8800

Tabel 3.9 Spesifikasi Torque meter LUTRON mode TQ-8800

Display Unit/ Resolution				
Unit	Max. range	High resolution	Low resolution	Over load protection range
kg-cm	15 kg-cm	0,01 kg-cm	0,1 kg-cm	22,5 kgf-cm max
Lb-inch	12,99 Lb-inch	0,01 Lb-inch	0,1 Lb-inch	19,53 Lbf-inch max
N-cm	147,1 N-cm	0,1 N-cm	1 N-cm	220,1 N-cm max

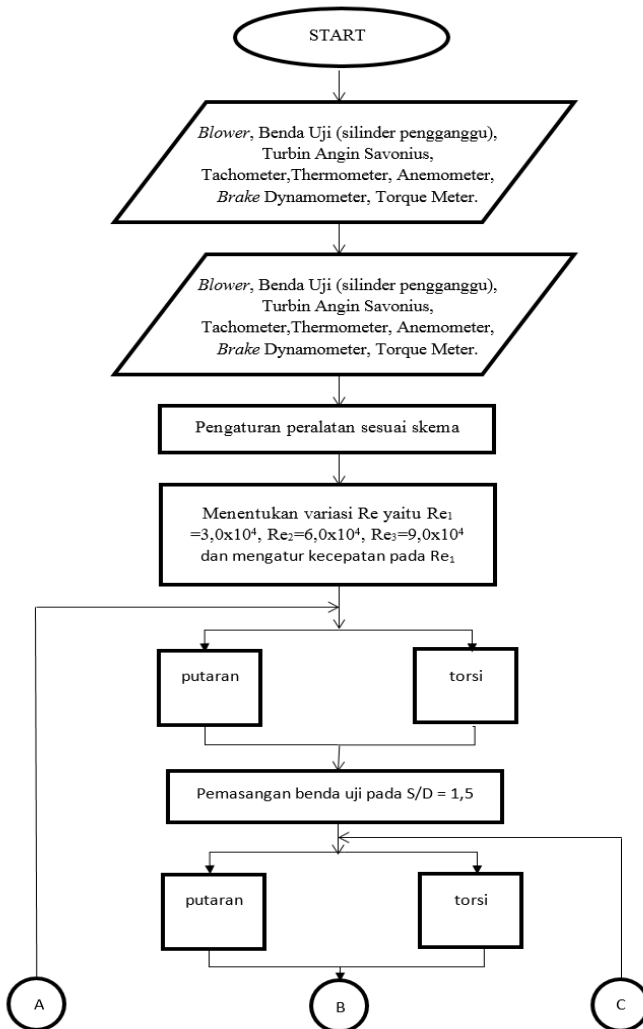
3.4 Prosedur Penelitian

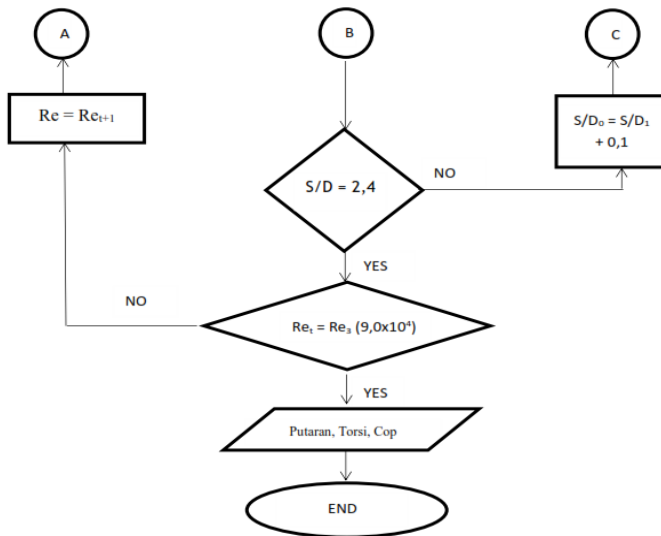
Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam pengambilan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Perencanaan peralatan yang akan digunakan.
2. Pemasangan benda uji pada dudukan meja.
3. Menyalakan *blower* dan mengatur besar voltase dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan nilai kecepatan sesuai dengan yang diharapkan.
4. Melakukan pengukuran temperatur dengan menggunakan Thermometer.
5. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan Anemometer untuk mendapatkan *Reynolds Number* yang diinginkan, yaitu $3,0 \times 10^4$.
6. Melakukan pengukuran putaran poros turbin angin dengan menggunakan Tachometer.
7. Melakukan pengukuran torsi dinamis dengan menggunakan *Brake dynamometer*
8. Melakukan pengukuran torsi statis dengan menggunakan Torque meter.
9. Mematikan blower.
10. Mengulangi langkah 3 sampai 8 dengan merubah bilangan Reynolds menjadi $6,0 \times 10^4$ dan $9,0 \times 10^4$
11. Memasang silinder pengganggu di depan *returning blade* dengan variasi jarak (S/D) adalah 1,5 ($S = 1,5 \times 101,6 = 152,4$ mm)
12. Mengulangi langkah 3 sampai 11 dengan merubah S/D sebesar 1,6 ; 1,7 ; 1,8 ; 1,9 ; 2,0 ; 2,1 ; 2,2 ; 2,3 ; 2,4
13. Mematikan *blower*.
14. Mengolah semua data yang diperoleh (putaran, torsi dinamis, torsi statis) dan melakukan *plotting* grafik Torsi statis terhadap S/D, Putaran terhadap S/D, dan *Coefficient of Power (Cop)* terhadap S/D.
15. Membandingkan hasil data yang diperoleh antara turbin angin Savonius berpengganggu dengan turbin angin Savonius tanpa pengganggu.

3.5 Flowchart Penelitian

Urutan langkah pengambilan data dalam penelitian ini dapat digambarkan dalam diagram alir sebagai berikut :





Gambar 3.11 *Flowchart* pengambilan data

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Penelitian

4.1.1 Perhitungan Reynolds Number

➤ Massa jenis udara (ρ)

Perhitungan massa jenis udara menggunakan penerapan hukum Boyle - Gay Lussac mengenai pemuaian gas yaitu :

$$\frac{P_1 \times V_1}{T_1} = \frac{P_2 \times V_2}{T_2} \dots\dots\dots(4.1)$$

Dimana $V = \frac{m}{\rho}$ sehingga persamaan 4.1 menjadi :

$$\frac{P_1 \times m_1}{T_1 \times \rho_1} = \frac{P_2 \times m_2}{T_2 \times \rho_2} \dots\dots\dots(4.2)$$

dimana:

m_1 = massa udara pada keadaan standar

m_2 = massa udara pada saat pengukuran

P_1 = tekanan absolut udara pada saat keadaan standar =
1,01325 N/m²

P_2 = tekanan absolut udara pada saat pengukuran

T_1 = temperatur udara standar = 288,2 K

T_2 = temperatur ruangan kerja = 27°C = 300 K

ρ_1 = massa jenis udara pada saat keadaan standar = 1,225
kg/m³

ρ_2 = massa jenis udara pada saat pengukuran

Karena keadaan standar dan keadaan saat pengukuran dilakukan berada pada ketinggian yang sama, sehingga :

$$P_1 = P_2$$

Dan karena massa udara pada keadaan standar dan pada keadaan pengukuran itu sama, maka :

$$m_1 = m_2$$

Dari batasan tersebut, maka persamaannya menjadi:

$$\rho_2 = \frac{T_1 \times \rho_1}{T_2} \dots\dots\dots(4.3)$$

$$\rho_2 = \frac{288,2K \times 1,225 \frac{kg}{m^3}}{300K} = 1,1768 \frac{kg}{m^3}$$

➤ **Viskositas absolut udara**

Perhitungan viskositas absolut udara menggunakan persamaan Sutherland, yaitu :

$$\mu_2 = \frac{b \times (T_2)^{0,5}}{1 + \frac{S}{T_2}} \dots\dots\dots(4.4)$$

dimana:

$$b = 1,458 \times 10^{-6} \text{ Kg/m.s.K}^{0,5}$$

$$S = 110,4 \text{ K}$$

sehingga:

$$\mu_2 = \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{kg}{m.s.K^{0,5}} \times (300)^{0,5}}{1 + \frac{110,4 \text{ K}}{300 \text{ K}}} = 1,846 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}$$

➤ **Kecepatan *free stream***

Berikut merupakan persamaan untuk mendapatkan kecepatan *free stream* :

$$V = \frac{Re \times \mu}{\rho_2 \times L} = \frac{60000 \times 1,846 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}}{1,1768 \frac{kg}{m^3} \times 0,1902 \text{ m}} \dots\dots\dots(4.5)$$

$$V = 4,95 \text{ m/s}$$

4.1.2 Perhitungan *Coefficient of Power*

Perhitungan *Coefficient of Power (CoP)* ini didapatkan dari persamaan sebagai berikut:

$$Cop = \frac{P_T}{P_w} \dots\dots\dots(4.6)$$

P_T didapatkan dari daya mekanis rotor turbin yang dihitung dari torsi dinamis yang dihasilkan oleh turbin. Adapun nilai P_T tersebut dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_T = T \times \omega \dots\dots\dots(4.7)$$

dimana :

T = Torsi dinamis turbin yang dalam penelitian diukur dengan menggunakan *Brake Dynamometer* (N-m)

ω = Kecepatan putaran turbin angin Savonius (rad/s)

Dengan menggunakan persamaan 2.7 dan 2.8, maka didapatkan persamaan berikut:

$$P_T = \frac{T\pi n}{30}$$

Sedangkan daya teoritis (P_w) didapatkan dari energi aliran angin (*free stream*) sesuai dengan persamaan energi sebagai berikut :

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V^3 \dots \dots \dots (4.9)$$

Dimana :

ρ = massa jenis aliran fluida (kg/m^3)

A = luasan turbin tegak lurus terhadap arah aliran (m^2)

V^3 = kecepatan aliran fluida (m/s)

Sehingga besar Cop dapat dihitung sebagai berikut :

$$Cop = \frac{\frac{T\pi n}{30}}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \dots \dots \dots (4.10)$$

Pada penelitian ini besar luasan A ditentukan sebagai

$$\begin{aligned} A &= (2D-b) \times H \dots \dots \dots (4.11) \\ &= (2(0.1016) - 0.013) \times 0,3 \\ &= 0.05706 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Pada penelitian ini besar Torsi ditentukan sebagai

$$\begin{aligned} T &= F \times r \dots \dots \dots (4.12) \\ T &= (m-s) \times g \times r \\ &= (0,095 \text{ kg} - 0,05 \text{ kg}) \times (9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) \times (0.01 \text{ m}) \\ &= 0,00441 \text{ N.m} \end{aligned}$$

Sehingga nilai Cop pada pengukuran $Re = 60000$ dan besar $S/D = 1,6$ didapatkan

$$\begin{aligned} Cop &= \frac{(0,00441 \text{ N.m}) \times (\frac{22}{7}) \times (318,7 \text{ rpm})}{\frac{1}{2} (1,1768 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) \times (0,05706 \text{ m}^2) \times (4.95^3 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3})} \\ &= 0,0362 \\ &= 3,62 \% \end{aligned}$$

4.1.3 Perhitungan *Tip Speed Ratio*

Perhitungan *Tip Speed Ratio* (λ) dilakukan dengan membandingkan antara kecepatan pada sudu dengan kecepatan aliran yang masuk. Dalam perumusannya sebagai berikut :

$$\lambda = \frac{\omega \times R}{V} \dots \dots \dots (4.13)$$

dimana,

ω = kecepatan putar turbin (rad/s)

R = Jari-jari turbin (m)

V = kecepatan aliran fluida (m/s)

Pada penelitian ini besar ω ditentukan sebagai :

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{2\pi \times n}{60} \\ &= \frac{2 \times \frac{22}{7} \times 318,7 \text{ rpm}}{60} \\ &= 33,3876 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

Sehingga nilai TSR pada pengukuran $Re = 60000$ dan besar $S/D = 1,6$ didapatkan

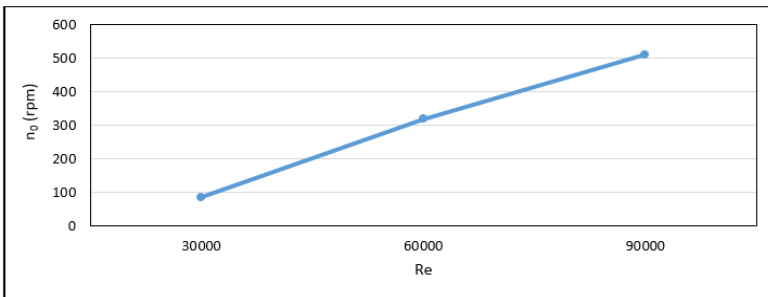
$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{33,3876 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \times 0,1902 \text{ m}}{4,95 \text{ m/s}} \\ &= 0,6414 \end{aligned}$$

4.2 Analisis Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu dengan Variasi Reynolds Number $3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; dan $9,0 \times 10^4$

Analisa dari performa turbin angin Savonius pada eksperimen ini dilakukan dengan menggunakan konfigurasi sebuah pengganggu berupa silinder sirkular. Silinder sirkular yang digunakan memiliki diameter sebesar 101,6 mm yang diletakkan di depan *returning blade* dengan jarak S/D yaitu $1,5 \leq S/D \leq 2,4$. Sebelum dilakukan analisa performa dari turbin angin Savonius akibat konfigurasi tersebut, perlu dilakukan analisa performa turbin angin Savonius tanpa adanya kehadiran silinder sirkular pengganggu.

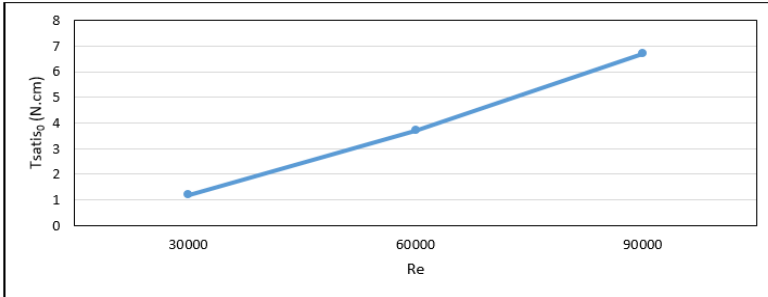
Pengukuran performa turbin angin Savonius tanpa adanya silinder sirkular dilakukan untuk mengetahui kondisi awal dari

performa turbin angin Savonius yang akan dibandingkan dengan kondisi ketika menggunakan konfigurasi silinder sirkular pengganggu untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hasil pengukuran performa turbin Savonius tanpa menggunakan benda pengganggu pada kondisi suhu $T = 28^{\circ}\text{C}$. Pada gambar 4.1 untuk grafik data putaran standar turbin (n_0), gambar 4.2 untuk grafik data torsi statis standar turbin (T_0), gambar 4.3 untuk grafik data *Coefficient of power* standar turbin (CoP_0). Dari data tersebut didapatkan performa turbin angin Savonius dalam kondisi standar. Kondisi standar yang didapatkan ini digunakan sebagai acuan yang akan dibandingkan dengan data hasil eksperimen dengan menggunakan konfigurasi silinder sirkular pengganggu.



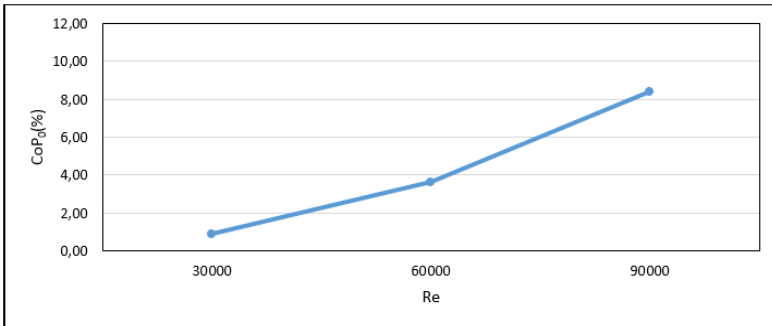
Gambar 4.1 Grafik putaran turbin tanpa silinder pengganggu (n_0) fungsi Reynolds Number

Gambar 4.1 menjelaskan tentang hasil pengukuran data standar performa putaran turbin angin Savonius. Data putaran kondisi standar yaitu pada $Re = 3,0 \times 10^4$ didapatkan 86,8 rpm, pada $Re = 6,0 \times 10^4$ didapatkan 318,7 rpm, serta pada $Re = 9,0 \times 10^4$ didapatkan 510 rpm. Dari grafik di atas diketahui bahwa pengaruh dari kenaikan Reynolds Number mengakibatkan putaran turbin angin Savonius juga meningkat. Hal itu disebabkan pada Reynolds Number yang lebih besar akan menyebabkan kecepatan aliran udara *free stream* akan semakin cepat. Aliran udara yang semakin cepat akan menimbulkan gaya dorong udara terhadap turbin semakin besar yang akan menyebabkan putaran turbin yang dihasilkan juga semakin besar.



Gambar 4.2 Grafik torsi statis turbin tanpa silinder pengganggu ($T_{statis0}$) fungsi Reynolds *Number*

Gambar 4.2 menjelaskan tentang hasil pengukuran data standar performa torsi statis turbin angin Savonius. Data torsi statis kondisi standar yaitu pada $Re = 3,0 \times 10^4$ didapatkan 1,2 N-cm. Data torsi statis kondisi standar yaitu pada $Re = 6,0 \times 10^4$ didapatkan 3,7 N-cm. Data torsi statis kondisi standar yaitu pada $Re = 9,0 \times 10^4$ didapatkan 6,7 N-cm. Dari grafik di atas dapat disimpulkan bahwa pengaruh dari kenaikan Reynolds *Number* mengakibatkan torsi statis turbin angin Savonius juga meningkat. Hal itu disebabkan pada Reynolds *Number* yang lebih besar akan menyebabkan kecepatan aliran udara *free stream* semakin cepat. Aliran udara yang semakin cepat akan menimbulkan gaya dorong udara terhadap turbin semakin besar yang akan menyebabkan torsi statis turbin yang dihasilkan juga semakin besar. Torsi statis yang semakin besar pada Reynolds *Number* yang semakin besar menandakan bahwa semakin besar kecepatan aliran udara maka semakin besar energi angin yang dikonversikan menjadi torsi statis turbin angin Savonius.



Gambar 4.3 Grafik *Coefficient of Power* turbin tanpa silinder pengganggu (CoP_0) fungsi Reynolds Number

Gambar 4.3 menjelaskan tentang hasil pengukuran data standar performa *coefficient of power* turbin Savonius. Dari grafik diatas menunjukkan bahwa pengaruh dari kenaikan Reynolds Number mengakibatkan *coefficient of power* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius juga semakin meningkat. Berdasarkan persamaan untuk mendapatkan nilai *coefficient of power* yaitu, $CoP = \frac{T \times \omega}{\frac{1}{2} \rho V^3 A}$, dimana nilai *coefficient of power* dipengaruhi oleh kecepatan angin (V), torsi dinamis (T) dan putaran (ω). Pada Reynolds Number $Re = 3,0 \times 10^4$ memiliki kecepatan angin yang paling rendah, sehingga menghasilkan besar nilai putaran dan torsi dinamis yang paling rendah juga. Oleh karena itu nilai *coefficient of power* pada $Re = 3,0 \times 10^4$ memiliki nilai yang paling kecil dibandingkan dengan $Re = 6,0 \times 10^4$ dan $Re = 9,0 \times 10^4$. Seiring dengan meningkatnya Reynolds Number, maka nilai kecepatan angin, torsi dinamis, dan putaran juga semakin besar. Namun, nilai putaran memiliki peningkatan yang drastis atau lebih besar dibandingkan peningkatan kecepatan angin. Hal ini membuat nilai *coefficient of power* semakin meningkat seiring dengan meningkatnya Reynolds Number. Adanya konfigurasi benda pengganggu diharapkan akan meningkatkan performa turbin Savonius yang akan dijelaskan dari perbandingan performa turbin Savonius dalam kondisi standar. Nilai *coefficient of power* pada

$Re = 3,0 \times 10^4$ didapatkan 0,88%, pada $Re = 6,0 \times 10^4$ didapatkan 3,62%, dan pada $Re = 9,0 \times 10^4$ didapatkan 8,41%.

4.3 Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius

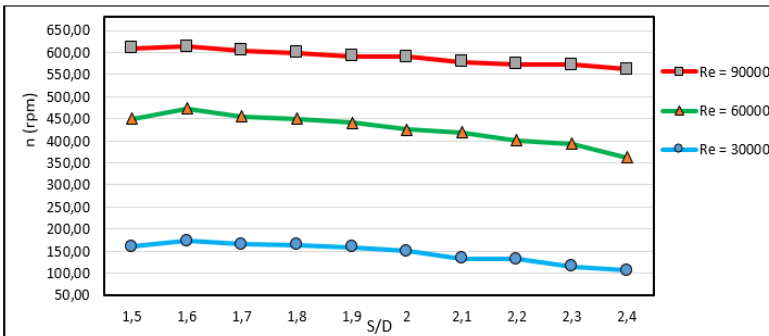
Studi eksperimental uji performa turbin angin Savonius ini dilakukan dengan menggunakan penambahan konfigurasi benda pengganggu berupa silinder sirkular. Besar benda pengganggu yang digunakan yaitu $d/D = 1$ atau $d = 101,6$ mm. Adapun variasi yang digunakan untuk mengetahui fenomena performa turbin angin Savonius yaitu jarak S/D sebesar $1,5 \leq S/D \leq 2,4$ dan variasi Reynolds Number yaitu $3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; dan $9,0 \times 10^4$.

4.3.1 Putaran Turbin Angin Savonius dengan Pengganggu Berupa Silinder Sirkular

Pengukuran putaran turbin ini dilakukan dengan menggunakan *tachometer* yang diarahkan pada bagian *returning blade* turbin angin Savonius yang sudah dipasang *scotlight* agar dapat menghitung nilai putaran pada turbin. Analisa putaran turbin angin Savonius dilakukan dengan plot grafik putaran terhadap variasi S/D serta variasi Reynolds Number seperti terdapat pada gambar 4.4.

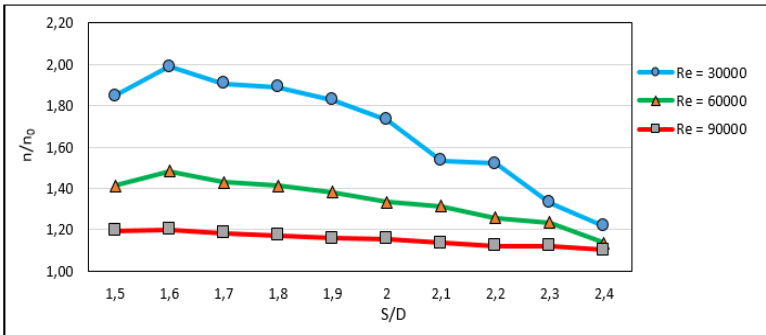
Dari gambar 4.4 terlihat bahwa besar putaran turbin sebanding dengan variasi Reynolds Number yang digunakan. Semakin besar Reynolds Number yang digunakan menghasilkan putaran turbin yang lebih besar pula. Adapun putaran tertinggi yang didapat pada konfigurasi S/D sebesar 1,6 yaitu penempatan silinder pengganggu pada jarak 162.5 mm terhadap pusat *returning blade* pada $Re = 9,0 \times 10^4$. Pada $S/D = 1,6$ untuk $Re = 3,0 \times 10^4$ besar putaran turbin yang dihasilkan yaitu 172.62 rpm, $Re = 6,0 \times 10^4$ besar putaran turbin yang dihasilkan yaitu 472.63 rpm, sedangkan $Re = 9,0 \times 10^4$ besar putaran turbin yang dihasilkan yaitu 613 rpm, Putaran turbin yang meningkat pada Reynolds Number yang lebih besar, dipengaruhi oleh meningkatnya energi angin yang diterima oleh turbin akibat kecepatan udara sehingga gaya dorong

yang diterima oleh turbin angin Savonius semakin besar menyebabkan peningkatan putaran turbin angin Savonius.



Gambar 4.4 Grafik putaran turbin (n) terhadap variasi S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$

Gambar 4.5 menjelaskan tentang efek peningkatan performa turbin angin Savonius dengan membandingkan nilai putaran turbin angin Savonius yang disajikan dalam bentuk grafik n/n_0 dengan variasi besar S/D . Grafik n/n_0 ini digunakan untuk menjelaskan besar peningkatan putaran turbin akibat adanya konfigurasi benda pengganggu. Pada $Re = 3,0 \times 10^4$, nilai n/n_0 maksimum didapatkan pada jarak $S/D = 1,6$ yaitu sebesar 1,99 dan nilai n/n_0 minimum didapatkan pada jarak $S/D = 2,4$ yaitu sebesar 1,22. Pada $Re = 6,0 \times 10^4$, nilai n/n_0 maksimum didapatkan pada jarak $S/D = 1,6$ yaitu sebesar 1,48 dan nilai n/n_0 minimum didapatkan pada jarak $S/D = 2,4$ yaitu sebesar 1,14. Sedangkan pada $Re = 9,0 \times 10^4$, nilai n/n_0 maksimum didapatkan pada jarak $S/D = 1,6$ yaitu sebesar 1,2 dan nilai n/n_0 minimum didapatkan pada jarak $S/D = 2,4$ yaitu sebesar 1,1. Berdasarkan data tersebut, dapat disimpulkan bahwa untuk semua besar Re dan S/D yang digunakan menghasilkan nilai $n/n_0 > 1$ sehingga penambahan konfigurasi silinder pengganggu efektif untuk meningkatkan besar putaran turbin angin Savonius.



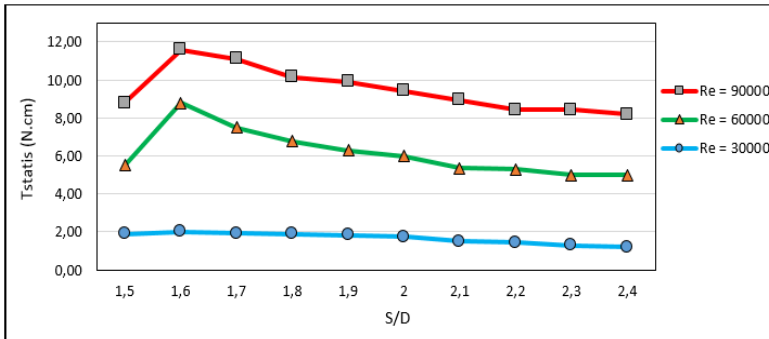
Gambar 4.5 Grafik fungsi n/n_0 terhadap variasi besar S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$

Fenomena yang terjadi diatas diakibatkan oleh penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* kedua sudu semakin besar. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh **Igarashi [4]** tentang eksperimen penurunan gaya *drag* yang diterima oleh sebuah silinder dengan penambahan sebuah silinder sirkular yang berdiameter sama. Pada jarak S/D tertentu gaya *drag* pada sisi *returning blade* yang diperoleh memiliki nilai negatif. Sehingga putaran turbin angin Savonius yang dihasilkan menjadi lebih besar. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.5, nilai putaran turbin pada jarak $S/D = 1,6$ lebih besar jika dibandingkan dengan variasi jarak S/D yang lainnya. Sehingga fenomena yang terlihat adalah putaran turbin semakin meningkat ketika variasi jarak silinder pengganggu dinaikkan dari nilai $S/D = 1,5$ menjadi $1,6$. Namun, apabila variasi jarak S/D yang digunakan lebih besar dari $1,6$, putaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius semakin turun seiring dengan penambahan S/D atau semakin jauhnya letak silinder pengganggu terhadap turbin angin Savonius.

4.3.2 Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Benda Pengganggu Berupa Silinder Sirkular

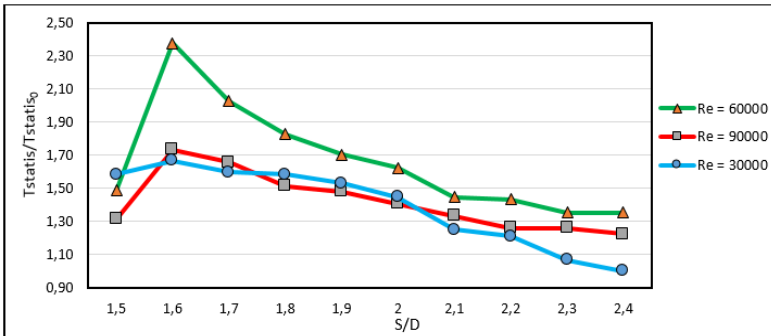
Pengukuran torsi statis turbin ini dilakukan menggunakan torque meter yang dihubungkan langsung dengan poros turbin. Pengukuran dilakukan dengan cara menahan sudu turbin angin Savonius tetap pada sudut 0° . Dari gambar 4.6 terlihat bahwa dengan meningkatnya nilai Reynolds Number akan menghasilkan torsi statis yang lebih besar. Pada konfigurasi S/D sebesar 1,6 yaitu penempatan silinder pengganggu pada jarak 152.5 mm memiliki nilai torsi statis tertinggi. Pada S/D = 1,6 untuk $Re = 3,0 \times 10^4$ besar torsi statis turbin yang dihasilkan yaitu 2,0 N-cm, untuk $Re = 6,0 \times 10^4$ besar torsi statis turbin yang dihasilkan yaitu 8,8 N-cm, sedangkan untuk $Re = 9,0 \times 10^4$ besar torsi statis turbin yang dihasilkan yaitu 11,6 N-cm.

Fenomena yang terjadi dibawah diakibatkan oleh penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* kedua sudu semakin besar. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Igarashi [4] tentang eksperimen penurunan gaya *drag* yang diterima oleh sebuah silinder dengan penambahan sebuah silinder sirkular yang berdiameter sama. Pada jarak S/D tertentu gaya *drag* pada sisi *returning blade* yang diperoleh memiliki nilai negatif. Sehingga torsi statis turbin angin Savonius yang dihasilkan menjadi lebih besar. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.6, nilai torsi statis turbin pada jarak S/D = 1,6 lebih besar jika dibandingkan dengan variasi jarak S/D yang lainnya. Sehingga fenomena yang terlihat adalah torsi statis turbin semakin meningkat ketika variasi jarak silinder pengganggu dinaikkan dari nilai S/D = 1,5 menjadi 1,6. Namun, apabila variasi jarak S/D yang digunakan lebih besar dari 1,6, torsi statis yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius semakin turun seiring dengan penambahan S/D atau semakin jauhnya letak silinder pengganggu terhadap turbin angin Savonius. Hingga pada jarak S/D paling jauh yaitu sebesar 2,4 menghasilkan nilai torsi statis turbin terkecil.



Gambar 4.6 Grafik T_{statis} turbin terhadap variasi S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$

Pada gambar 4.7 menjelaskan tentang efek penambahan performa turbin dari segi torsi statis yang dihasilkan yang disajikan dalam bentuk grafik $T_{\text{statis}} / T_{\text{statis0}}$ dengan variasi besar S/D. Besar $T_{\text{statis}} / T_{\text{statis0}}$ yang didapatkan ini adalah hasil bagi antara besar torsi statis yang dihasilkan akibat adanya konfigurasi benda pengganggu dengan besar torsi statis tanpa adanya benda pengganggu atau dalam kondisi standar. Grafik $T_{\text{statis}} / T_{\text{statis0}}$ ini digunakan untuk menjelaskan besar peningkatan torsi statis turbin akibat adanya konfigurasi benda pengganggu. Pada $Re = 3,0 \times 10^4$, nilai $T_{\text{statis}} / T_{\text{statis0}}$ maksimum didapatkan pada jarak S/D = 1,6 yaitu sebesar 1,67 dan nilai $T_{\text{statis}} / T_{\text{statis0}}$ minimum didapatkan pada jarak S/D = 2,4 yaitu sebesar 1. Pada $Re = 6,0 \times 10^4$, nilai $T_{\text{statis}} / T_{\text{statis0}}$ maksimum didapatkan pada jarak S/D = 1,6 yaitu sebesar 2,38 dan nilai $T_{\text{statis}} / T_{\text{statis0}}$ minimum didapatkan pada jarak S/D = 2,4 yaitu sebesar 1,35. Sedangkan pada $Re = 9,0 \times 10^4$, nilai $T_{\text{statis}} / T_{\text{statis0}}$ maksimum didapatkan pada jarak S/D = 1,6 yaitu sebesar 1,73 dan nilai $T_{\text{statis}} / T_{\text{statis0}}$ minimum didapatkan pada jarak S/D = 2,5 yaitu sebesar 1,22. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa untuk sebagian besar Re dan S/D yang digunakan menghasilkan nilai $T_{\text{statis}} / T_{\text{statis0}} > 1$. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan konfigurasi silinder pengganggu efektif untuk meningkatkan besaran torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius.



Gambar 4.7 Grafik fungsi $T_{statis}/T_{statis0}$ terhadap variasi besar S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$

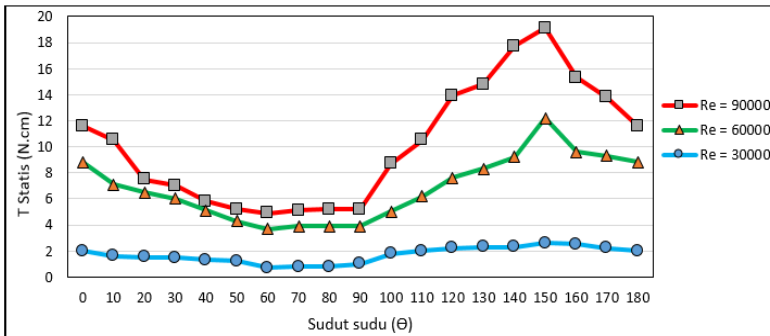
Fenomena yang terjadi diatas diakibatkan oleh penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* kedua sudu semakin besar. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh **Igarashi [4]** tentang eksperimen penurunan gaya *drag* yang diterima oleh sebuah silinder dengan penambahan sebuah silinder sirkular yang berdiameter sama. Pada jarak S/D tertentu gaya *drag* pada sisi *returning blade* yang diperoleh memiliki nilai negatif. Sehingga peningkatan nilai torsi statis turbin angin Savonius yang dihasilkan menjadi lebih besar. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.7, nilai peningkatan torsi statis turbin pada jarak $S/D = 1,6$ lebih besar jika dibandingkan dengan variasi jarak S/D yang lainnya. Sehingga fenomena yang terlihat adalah torsi statis turbin semakin meningkat ketika variasi jarak silinder pengganggu dinaikkan dari nilai $S/D = 1,5$ menjadi 1,6. Namun, apabila variasi jarak S/D yang digunakan lebih besar dari 1,6, torsi statis yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius semakin menurun seiring dengan penambahan S/D . Semakin besar jarak S/D yang digunakan maka besar gaya *drag* *returning blade* semakin membesar sehingga mengakibatkan selisih gaya *drag* semakin kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa konfigurasi silinder pengganggu pada jarak tersebut sudah tidak terlalu efektif untuk meningkatkan performa dari turbin angin Savonius, sehingga

peningkatan nilai torsi statis yang didapatkan semakin turun seiring dengan penambahan S/D .

Hasil pengukuran torsi statis turbin yang telah dilakukan ini menunjukkan peningkatan besar torsi statis akibat adanya benda pengganggu. Hal ini diakibatkan oleh penurunan gaya *drag* pada *returning blade* yang mengakibatkan selisih gaya *drag* pada kedua sudu meningkat sehingga torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius semakin besar. Dengan kehadiran silinder pengganggu, aliran angin yang akan menuju turbin angin Savonius terganggu yang mengakibatkan terganggunya *boundary layer* yang terbentuk sehingga aliran semakin cepat mencapai kondisi turbulen. Serta pada posisi $\Theta = 0^\circ$, sisi *returning blade* tertutupi oleh silinder pengganggu yang memiliki ukuran diameter yang sama sehingga mengakibatkan terbentuknya daerah *wake* pada sisi *returning blade* sehingga gaya *drag* pada sisi *returning blade* mengalami penurunan nilai.

4.3.3 Torsi Statis Sebagai Fungsi Sudut Buka-an Sudu pada Jarak $S/D = 1,6$

Pada gambar 4.8 menunjukkan grafik torsi statis turbin angin Savonius (T_{statis}) dengan pengganggu silinder sirkular yang memiliki diameter (d) = 101,6 mm. Pengukuran torsi statis dilakukan dengan kondisi turbin angin dalam keadaan tidak berputar. Grafik yang ditampilkan merupakan nilai torsi statis sebagai fungsi sudut pada $S/D = 1,6$ dimana pada jarak S/D tersebut memiliki nilai torsi statis yang terbesar. Penelitian dilakukan dengan bukaan sudut sudu dalam rentang 0° hingga 180° dengan kenaikan setiap 10° .

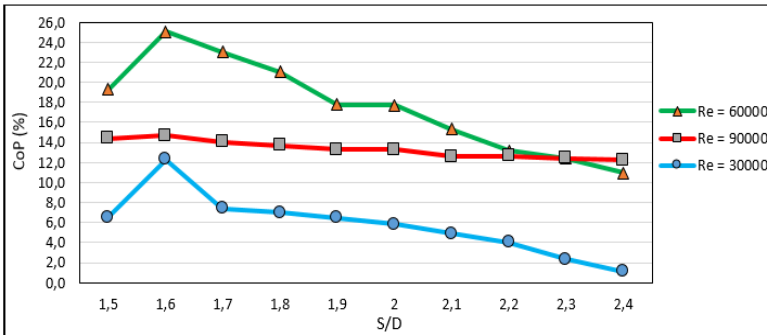


Gambar 4.8 Grafik T_{statis} turbin berpengganggu sebagai fungsi sudut (Θ) pada jarak $S/D = 1,6$

Pada gambar 4.8 didapatkan pada $Re = 3,0 \times 10^4$, nilai T_{statis} maksimum didapatkan pada $\Theta = 150^\circ$ yaitu sebesar 2,6 N-cm dan nilai T_{statis} minimum didapatkan pada $\Theta = 60^\circ$ yaitu sebesar 0,7 N-cm. Pada $Re = 6,0 \times 10^4$, nilai T_{statis} maksimum didapatkan pada $\Theta = 150^\circ$ yaitu sebesar 12,2 N-cm dan nilai T_{statis} minimum didapatkan pada $\Theta = 60^\circ$ yaitu sebesar 3,7 N-cm. Sedangkan pada $Re = 9,0 \times 10^4$, nilai T_{statis} maksimum didapatkan pada $\Theta = 150^\circ$ yaitu sebesar 19,1 N-cm dan nilai T_{statis} minimum didapatkan pada $\Theta = 60^\circ$ yaitu sebesar 4,9 N-cm.

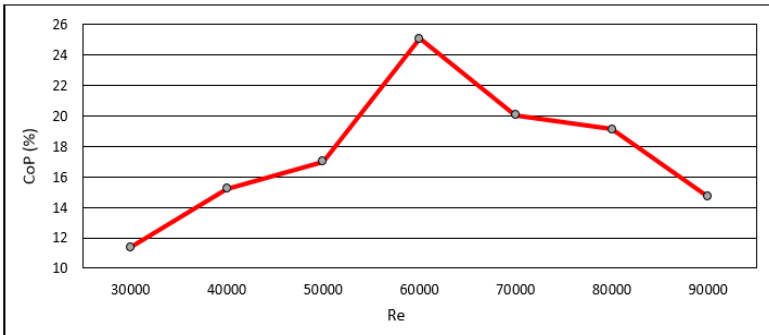
4.3.4 *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius dengan Pengganggu Berupa Silinder Sirkular

Analisi *CoP* turbin angin Savonius dilakukan dengan plot grafik *CoP* terhadap variasi S/D serta variasi Reynolds Number seperti terdapat pada gambar 4.9. Dari grafik tersebut dapat diketahui besar pengaruh penambahan pengganggu terhadap performa turbin angin Savonius.



Gambar 4.9 Grafik *CoP* terhadap variasi *S/D* pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$

Pada gambar 4.9 terlihat bahwa nilai *CoP* terbaik didapatkan pada konfigurasi *S/D* sebesar 1,6 yaitu penempatan silinder pengganggu pada jarak 152,5 mm terhadap pusat *returning blade*. Pada *S/D* = 1,6 untuk $Re = 3,0 \times 10^4$ besar *CoP* turbin yang dihasilkan yaitu 12,27 %, untuk $Re = 6,0 \times 10^4$ besar *CoP* turbin yang dihasilkan yaitu 25,05%, sedangkan untuk $Re = 9,0 \times 10^4$ besar *CoP* turbin yang dihasilkan yaitu 14,7 %. *CoP* yang dihasilkan oleh turbin pada $Re = 6,0 \times 10^4$ memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan $Re = 3,0 \times 10^4$ dan $Re = 9,0 \times 10^4$ sangat berbeda dibandingkan dengan tren yang digambarkan pada Gambar 4.3. Hal ini terjadi karena pada Reynolds Number $6,0 \times 10^4$ dapat menghasilkan kenaikan daya yang lebih besar dibandingkan Reynolds Number yang lainnya. Pada jarak *S/D* = 1,5; nilai *CoP* pada $Re = 3,0 \times 10^4$ sebesar 6,52 %, pada $Re = 6,0 \times 10^4$ sebesar 19,31%, pada $Re = 9,0 \times 10^4$ sebesar 14,4%. Berikut merupakan Gambar 4.10 yang menjelaskan mengenai letak nilai optimum *CoP* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dari rentang $Re = 3,0 \times 10^4 \leq Re \leq 9,0 \times 10^4$, dengan kenaikan setiap $Re = 1,0 \times 10^4$ dengan konfigurasi *S/D* = 1,6.



Gambar 4.10 Grafik fungsi *CoP* terhadap variasi besar Reynolds Number pada $S/D = 1,6$

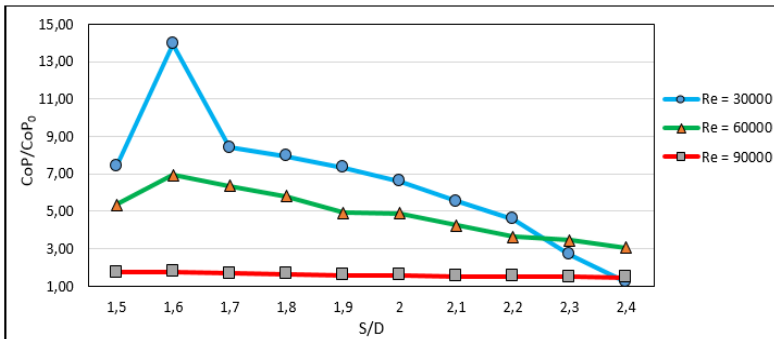
Gambar 4.9 juga menunjukkan bahwa pada Reynolds Number $3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$ nilai *CoP* mengalami peningkatan nilai apabila variasi jarak S/D dinaikkan dari nilai $S/D = 1,5$ menjadi $1,6$. Fenomena yang terjadi diatas disebabkan oleh adanya konfigurasi silinder pengganggu ini akan menyebabkan *shear layer* dari silinder pengganggu memberikan gangguan terhadap *boundary layer returning blade*. Dengan adanya gangguan tersebut membuat transisi aliran dari laminar menjadi turbulen semakin cepat. Hal ini menyebabkan momentum aliran pada daerah kontur *returning blade* menjadi lebih besar yang mengakibatkan aliran dapat menahan *adverse pressure gradient* serta gaya gesek yang terjadi, sehingga titik separasi menjadi lebih mundur ke belakang dan daerah *wake* yang semakin sempit. Sehingga torsi yang dihasilkan oleh *returning blade* turun dan membuat selisih torsi antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin besar. Hal inilah yang menyebabkan daya dan putaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius akan meningkat.

Selain itu, fenomena yang terjadi diatas juga diakibatkan oleh penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* kedua sudu semakin besar yang menyebabkan nilai torsi yang dihasilkan semakin besar. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Igarashi [4] tentang eksperimen penurunan gaya *drag* yang diterima oleh sebuah

silinder dengan penambahan sebuah silinder sirkular yang berdiameter sama. Pada jarak S/D tertentu gaya *drag* pada sisi *returning blade* yang diperoleh memiliki nilai negatif. Sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin besar, menyebabkan nilai torsi yang semakin besar, yang pada akhirnya CoP yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius yang dihasilkan menjadi lebih besar. Sehingga fenomena yang terlihat CoP semakin meningkat ketika variasi jarak silinder pengganggu dinaikkan dari nilai $S/D = 1,5$ menjadi $1,6$.

Namun, apabila variasi jarak S/D yang digunakan lebih besar dari $1,6$, CoP yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius semakin turun seiring dengan penambahan S/D yang terjadi pada semua variasi Reynolds *Number*. Dengan adanya penambahan jarak melebihi $S/D = 1,6$, mengindikasikan gaya *drag* pada sisi *returning blade* membesar, sehingga mengakibatkan torsi yang dihasilkan turun, yang pada akhirnya CoP yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius menjadi turun jika dibandingkan pada jarak $S/D = 1,6$. Hingga pada jarak S/D paling jauh yaitu sebesar $2,4$, turbin angin Savonius menghasilkan CoP terkecil untuk semua variasi Reynolds *Number*.

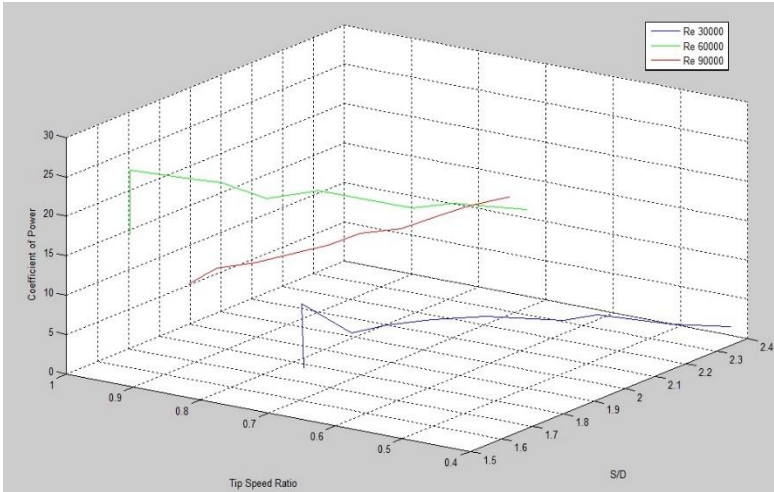
Untuk ketiga variasi Reynolds *Number* pada penelitian ini menghasilkan kesimpulan bahwa nilai puncak (*peak value*) dari CoP yang dihasilkan turbin angin Savonius berpengganggu ini berada pada jarak $S/D = 1,6$. Hal ini menunjukkan bahwa jarak $S/D = 1,6$ merupakan jarak optimal diletakkannya silinder pengganggu. Pada $Re = 3,0 \times 10^4$ menghasilkan CoP sebesar $12,27\%$, pada $Re = 6,0 \times 10^4$ menghasilkan CoP sebesar $25,05\%$ dan pada $Re = 6,0 \times 10^4$ menghasilkan CoP sebesar $14,7\%$.



Gambar 4.11 Grafik fungsi CoP/CoP_0 terhadap variasi besar S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$

Pada gambar 4.11 menjelaskan tentang efek penambahan performa turbin dari peningkatan nilai CoP yang dihasilkan yang disajikan dalam bentuk grafik CoP/CoP_0 dengan variasi besar S/D . Besar CoP/CoP_0 yang didapatkan ini adalah hasil bagi antara CoP yang dihasilkan akibat adanya konfigurasi benda pengganggu dengan besar CoP tanpa adanya benda pengganggu atau dalam kondisi standar. Grafik CoP/CoP_0 ini digunakan untuk menjelaskan besar peningkatan CoP turbin akibat adanya konfigurasi benda pengganggu. Pada $Re = 3,0 \times 10^4$, nilai CoP/CoP_0 maksimum didapatkan pada jarak $S/D = 1,6$ yaitu sebesar 13,92 dan nilai CoP/CoP_0 minimum didapatkan pada jarak $S/D = 2,4$ yaitu sebesar 1,22. Pada $Re = 6,0 \times 10^4$, nilai CoP/CoP_0 maksimum didapatkan pada jarak $S/D = 1,6$ yaitu sebesar 6,92 dan nilai CoP/CoP_0 minimum didapatkan pada jarak $S/D = 2,4$ yaitu sebesar 3,03. Sedangkan pada $Re = 9,0 \times 10^4$, nilai CoP/CoP_0 maksimum didapatkan pada jarak $S/D = 1,6$ yaitu sebesar 1,75 dan nilai CoP/CoP_0 minimum didapatkan pada jarak $S/D = 2,4$ yaitu sebesar 1,45. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa untuk sebagian besar Re dan S/D yang digunakan menghasilkan nilai $CoP/CoP_0 > 1$. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan konfigurasi silinder pengganggu efektif untuk meningkatkan besaran CoP yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius.

4.3.5 *Coefficient of Power* sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada jarak $S/D = 1,5 - 2,4$



Gambar 4.12 Grafik *Coefficient of Power* fungsi *Tip Speed Ratio* dan S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$

Gambar 4.12 menunjukkan grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius dengan pengganggu silinder sirkular dengan diameter (d) = 101,6 mm. Grafik ditampilkan dalam nilai *Coefficient of Power* sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) yang merupakan parameter tak berdimensi yang besarnya didapatkan dari hasil pengukuran kecepatan aliran angin dan kecepatan putaran dari turbin pada jarak $S/D = 1,5-2,4$. Grafik diatas memperlihatkan bahwa dengan meningkatnya nilai dari *Tip Speed Ratio*, maka akan berdampak terhadap kenaikan dari *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. Pada jarak $S/D = 1,6$, *Coefficient of Power* serta *Tip Speed Ratio* terbesar untuk setiap variasi Reynolds Number. Untuk $Re = 3,0 \times 10^4$ besar *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius sebesar 12,27% pada *Tip Speed Ratio* sebesar 0,6963. Untuk $Re = 6,0 \times 10^4$ besar *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius sebesar 25,05% pada *Tip Speed Ratio*

sebesar 0,9513. Untuk $Re = 9,0 \times 10^4$ besar *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius sebesar 14,7% pada *Tip Speed Ratio* sebesar 0,8231.

Dari data diatas, dapat disimpulkan bahwa kenaikan dari *Tip Speed Ratio* menghasilkan kenaikan dari *Coefficient of Power* yang dihasilkan turbin angin Savonius. Dimana pada $Re = 60000$ dihasilkan *Tip Speed Ratio* terbesar yang memiliki nilai 0.9513 dengan *Coefficient of Power* terbesar yang memiliki nilai 25,05%. Besarnya *Coefficient of Power* dari turbin angin Savonius semakin menurun seiring dengan penurunan nilai *Tip Speed Ratio*.

Pada gambar 4.12 dapat dilihat bahwa pada setiap variasi Reynolds Number, nilai *Coefficient of Power* dan *Tip Speed Ratio* dipengaruhi oleh variasi jarak S/D. Pada jarak S/D=1,5 hingga 1,6 terjadi peningkatan nilai *Coefficient of Power* dan *Tip Speed Ratio*. Penambahan silinder pengganggu ini akan menyebabkan *shear layer* dari silinder pengganggu memberikan gangguan terhadap *boundary layer returning blade*. Dengan adanya gangguan tersebut membuat transisi aliran dari laminar menjadi turbulen semakin cepat. Hal ini menyebabkan momentum aliran pada daerah kontur *returning blade* menjadi lebih besar yang mengakibatkan aliran dapat menahan *adverse pressure gradient* serta gaya gesek yang terjadi, sehingga titik separasi menjadi lebih mundur ke belakang dan daerah *wake* yang semakin sempit. Sehingga torsi yang dihasilkan oleh *returning blade* turun dan membuat selisih torsi antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin besar. Hal inilah yang menyebabkan daya dan putaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius akan meningkat. Oleh karena itu nilai *CoP* dan *TSR* mengalami kenaikan.

Selain itu, fenomena yang terjadi diatas juga diakibatkan oleh penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* kedua sudu semakin besar yang menyebabkan nilai torsi yang dihasilkan semakin besar. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Igarashi [4] tentang eksperimen penurunan gaya *drag* yang diterima oleh sebuah

silinder dengan penambahan sebuah silinder sirkular yang berdiameter sama. Pada jarak S/D tertentu gaya *drag* pada sisi *returning blade* yang diperoleh memiliki nilai negatif. Sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin besar, menyebabkan nilai torsi yang semakin besar, yang pada akhirnya *CoP* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius yang dihasilkan menjadi lebih besar. Sehingga fenomena yang terlihat *CoP* semakin meningkat ketika variasi jarak silinder pengganggu dinaikkan dari nilai $S/D = 1,5$ menjadi $1,6$.

Namun, apabila variasi jarak S/D yang digunakan lebih besar dari $1,6$, *CoP* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius semakin turun seiring dengan penambahan S/D yang terjadi pada semua variasi Reynolds Number. Dengan adanya penambahan jarak melebihi $S/D = 1,6$, mengindikasikan gaya *drag* pada sisi *returning blade* membesar, sehingga mengakibatkan torsi yang dihasilkan turun, yang pada akhirnya *CoP* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius menjadi turun jika dibandingkan pada jarak $S/D = 1,6$. Hingga pada jarak S/D paling jauh yaitu sebesar $2,4$, turbin angin Savonius menghasilkan *CoP* terkecil untuk semua variasi Reynolds Number. Pada jarak $S/D = 1,7$ hingga $2,4$ terjadi penurunan nilai *Coefficient of Power* dan *Tip Speed Ratio*. Pada jarak $S/D = 2,4$, untuk $Re = 3,0 \times 10^4$ besar *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius sebesar $1,07\%$ pada *Tip Speed Ratio* sebesar $0,43$. Untuk $Re = 6,0 \times 10^4$ besar *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius sebesar $10,96\%$ pada *Tip Speed Ratio* sebesar $0,73$. Untuk $Re = 9,0 \times 10^4$ besar *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius sebesar $12,22\%$ pada *Tip Speed Ratio* sebesar $0,76$. Adanya penurunan nilai dari *Coefficient of Power* dan *Tip Speed Ratio* mengindikasikan bahwa kehadiran silinder pengganggu tidak efektif pada jarak tersebut. Apabila jarak diperbesar melebihi $S/D = 2,4$, maka aliran yang datang menuju turbin angin Savonius dapat dianggap sebagai aliran yang *freestream*.

Dari setiap variasi Reynolds Number pada penelitian ini, semuanya menunjukkan bahwa nilai puncak (*peak value*) dari *COP*

dan *TSR* turbin angin Savonius berpengganggu ini berada pada jarak $S/D = 1,6$. Hal ini menunjukkan bahwa jarak $S/D = 1,6$ merupakan titik optimal diletakkannya silinder pengganggu.

4.4 Perbandingan hasil eksperimen terhadap penelitian sebelumnya

Dalam melakukan studi eksperimen ini, hasil eksperimen yang telah didapatkan akan dibandingkan dengan referensi yang terkait dengan penelitian tentang pengaruh silinder pengganggu terhadap silinder utama, serta eksperimen tentang pengaruh silinder pengganggu terhadap performa turbin angin Savonius.

4.4.1 Penelitian Silinder Pengganggu

Pada penelitian **Igarashi [4]** dengan meletakkan silinder sirkuler pengganggu yang memiliki ukuran yang sama dengan silinder utama ($d/D = 1$). Adapun variasi yang dilakukan pada penelitian ini variasikan jarak antara kedua pusat silinder (L/D) dan perubahan *Reynolds Number* pada rentang $8,7 \times 10^3 \leq Re \leq 5,2 \times 10^4$. Pada rentang variasi jarak $S/D = 1,03 \leq S/D \leq 3,5$, terbentuk *vortices* tergolong kedalam bentuk *Quasi-stationary vortices* diantara kedua silinder. Hal ini menyebabkan penurunan gaya *drag* hingga memiliki nilai negatif *drag* pada silinder utama. Nilai koefisien *drag* terendah tercatat berada pada variasi jarak $L/d = 1,5$. Fenomena tersebut terjadi hingga pada variasi jarak $L/d > 2,5$. Setelah melewati variasi jarak tersebut, *Quasi-stationary vortices* menjadi tidak stabil yang menyebabkan terbentuknya *vortex shedding* yang menyebabkan arah aliran fluida berubah menuju silinder utama. Hingga pada variasi jarak $L/D > 3,53$, nilai koefisien *drag* meningkat secara signifikan hingga 0,45.

Pada penelitian ini, didapatkan peningkatan nilai putaran, torsi statis, dan *coefficient of power* yang dihasilkan oleh turbin apabila pada depan sisi *returning blade* diletakkan konfigurasi silinder sirkular pengganggu dengan variasi jarak S/D yaitu $S/D = 1,5 \leq S/D \leq 2,4$. Hal ini sesuai dengan jika dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh **Igarashi [4]**. Dimana pada penelitian yang dilakukan **Igarashi [4]**, koefisien gaya *drag*

mengalami penurunan nilai hingga memiliki nilai negatif *drag* pada silinder utama dengan rentang variasi jarak antara silinder utama dan silinder pengganggu yaitu hingga jarak maksimal nilai koefisien *drag* pada silinder utama bernilai negatif yaitu $S/D > 3,53$.

Pada penelitian ini, didapatkan nilai maksimal dari putaran, torsi statis, serta *coefficient of power* berada pada konfigurasi jarak $S/D = 1,6$. Hal ini mengindikasikan bahwa pada konfigurasi jarak tersebut, terjadi penurunan terbesar gaya *drag* pada bagian *returning blade*. Pada penelitian yang dilakukan **Igarashi [4]**, koefisien *drag* pada silinder utama memiliki nilai terkecil pada variasi jarak $L/d = 1$. Ketika variasi jarak ditambahkan, nilai koefisien *drag* mengalami peningkatan, hingga mengalami penurunan nilai lagi pada variasi jarak $L/d = 1,5$. Selanjutnya nilai koefisien *drag* pada silinder utama kembali meningkat apabila variasi jarak tersebut ditambahkan.

Hasil penelitian tentang peningkatan performa dari turbin angin Savonius ini seharusnya memiliki nilai peningkatan putaran, torsi, dan *coefficient of power* pada konfigurasi jarak $S/D = 1,5$, dimana menurut **Igarashi [4]**, koefisien *drag* pada silinder utama memiliki nilai terkecil pada variasi Reynolds Number dari $8,7 \times 10^3 \leq Re \leq 5,2 \times 10^4$. Namun, pada kenyataannya turbin angin Savonius mengalami peningkatan nilai putaran, torsi dan *coefficient of power* pada $Re = 3,0 \times 10^4$ konfigurasi jarak $S/D = 1,6$. Hal ini terjadi karena pada penelitian yang dilakukan oleh **Igarashi [4]** merupakan penelitian yang menempatkan silinder sirkular yang diam dan tidak berotasi. Sementara pada turbin angin Savonius, merupakan sisi *returning blade* memiliki setengah bentuk dari silinder sirkular serta terjadi rotasi pada turbin sehingga titik separasi dari aliran ketika melewati sisi *returning blade* berubah-ubah tergantung dari bukaan sudut dari sudu turbin. Hal ini dijelaskan pada gambar 4.8 dimana turbin angin Savonius memiliki nilai torsi yang berbeda-beda pada setiap bukaan sudut sudu turbin. Hal inilah yang menyebabkan peningkatan dari

putaran, torsi, dan *coefficient of power* turbin tidak berada pada konfigurasi jarak $S/D = 1,5$.

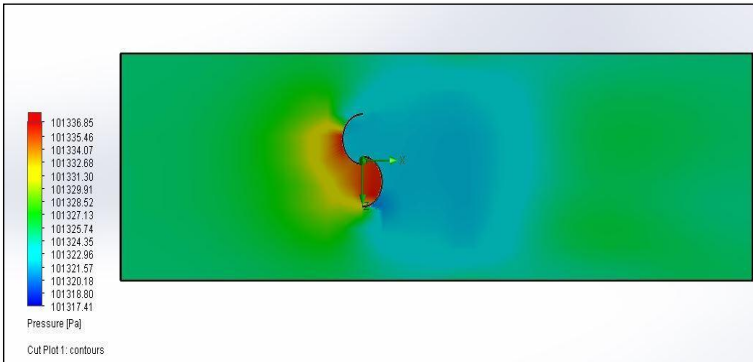
4.4.2 Penelitian turbin angin Savonius berpengganggu silinder sirkular

Pada penelitian peningkatan performa turbin angin Savonius dengan menempatkan silinder sirkular pengganggu di depan sisi *returning blade* dengan $d/D = 1$ pada variasi $Re = 6,0 \times 10^4$; $7,5 \times 10^4$ dan $9,0 \times 10^4$ yang dilakukan oleh **Tegar [9]** didapatkan bahwa terjadi peningkatan *coefficient of power* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius pada setiap variasi Reynolds Number dan jarak S/D . Pada penelitian yang dilakukan **Tegar [9]** didapatkan jarak pusat *returning blade* turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu yang efektif pada $S/D = 1,6$. Hal ini sesuai pada penelitian yang dilakukan kali ini, dimana nilai putaran, torsi dan *coefficient of power* yang dihasilkan turbin angin Savonius berada pada konfigurasi jarak $S/D = 1,6$.

Sementara nilai CoP/CoP_0 terbesar pada $Re = 6,0 \times 10^4$ dan $9,0 \times 10^4$ pada konfigurasi jarak $S/D = 1,6$ penelitian **Tegar [9]** tercatat sebesar 19,91 kali dan 4,14 kali. Namun, hal ini berbeda jika dibandingkan dengan hasil penelitian yang dilakukan kali ini, dimana nilai CoP/CoP_0 pada $Re = 6,0 \times 10^4$ dan $9,0 \times 10^4$ pada penelitian ini didapatkan sebesar 6,92 kali dan 1,75 kali. Nilai CoP/CoP_0 pada penelitian yang didapatkan **Tegar [9]** diketahui lebih besar jika dibandingkan dengan CoP/CoP_0 pada penelitian ini. Hal ini disebabkan karena adanya *blockage effect* pada penelitian yang dilakukan oleh **Tegar [9]** yang terhitung sebesar 18%, sehingga menyebabkan peningkatan nilai CoP/CoP_0 yang lebih besar dibandingkan pada penelitian kali ini. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh **Maskel [7]** yang menyatakan bahwa *blockage effect* menyebabkan peningkatan nilai dari koefisien *drag* pada benda uji, yaitu pada sisi *advancing blade* dan *returning blade*. Sehingga terjadi peningkatan nilai putaran, torsi dan *coefficient of power* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius pada penelitian yang dilakukan oleh **Tegar [9]**.

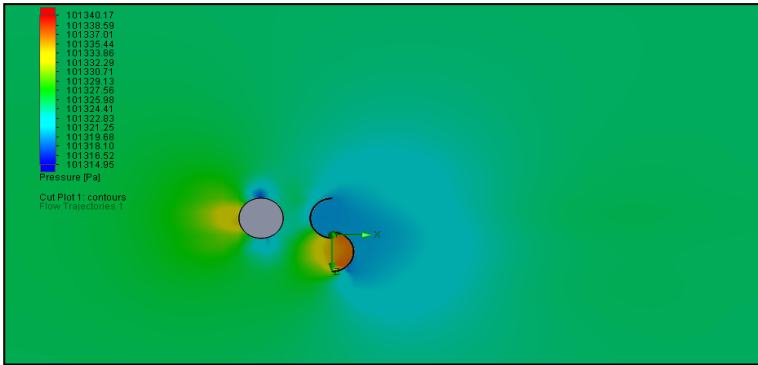
4.5 Simulasi aliran pada turbin angin Savonius

Dengan menggunakan *software solidworks*, dilakukan simulasi aliran yang terjadi pada turbin angin savonius tanpa penganggu dan dengan penganggu dengan $d/D = 0,75$ pada S/D yang optimal atau pada $S/D = 1,6$.



Gambar 4.13 Simulasi tekanan aliran yang melewati turbin angin Savonius tanpa penganggu pada $Re = 6,0 \times 10^4$

Pada gambar 4.13 merupakan simulasi tekanan yang ada pada turbin angin savonius ketika tidak diletakkan konfigurasi silinder sirkular sebagai pengganggu aliran. Simulasi dilakukan pada variasi Reynolds Number $6,0 \times 10^4$. Terlihat kedua sudu mengalami tekanan yang sedikit berbeda dimana pada sisi *advancing blade* memiliki warna merah yang lebih banyak dibandingkan dengan sisi *returning blade*. Warna merah menunjukkan tekanan yang terbesar dibandingkan dengan warna lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa adanya peletakkan silinder sirkular pengganggu, turbin dapat berputar karena tekanan pada sisi *advancing blade* lebih besar dibandingkan dengan tekanan pada sisi *returning blade*.



Gambar 4.14 Simulasi tekanan aliran yang melewati turbin angin Savonius berpengganggu dengan variasi jarak $S/D = 1,6$ pada $Re = 6,0 \times 10^4$

Pada gambar 4.14 merupakan simulasi tekanan yang ada pada turbin angin savonius ketika tidak diletakkan konfigurasi silinder sirkular sebagai pengganggu aliran. Simulasi dilakukan pada variasi Reynolds Number $6,0 \times 10^4$. Terlihat pada kedua sudu mengalami tekanan yang berbeda dimana pada sisi *advancing blade* didominasi oleh warna kuning yang memiliki tekanan yang lebih besar jika dibandingkan dengan tekanan pada sisi *returning blade* yang didominasi oleh warna hijau. Hal ini menjelaskan terjadi peningkatan selisih gaya *drag* yang dihasilkan oleh kedua sudu. Dengan meningkatnya selisih gaya *drag* akan meningkatkan torsi yang dihasilkan oleh turbin. Sehingga daya *output* yang dihasilkan oleh turbin semakin besar. Hal ini membuktikan bahwa dengan peletakkan konfigurasi silinder sirkular pada variasi jarak $S/D = 1,6$ efektif meningkatkan performa dari turbin angin Savonius.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Pada studi eksperimen pengaruh jarak benda pengganggu (S/D) berupa silinder sirkular berdiameter 101,6 mm terhadap performa turbin Savonius ini dapat disimpulkan sebagai berikut :

- 1) Adanya silinder pengganggu dengan ukuran $d/D = 1$ terbukti efektif meningkatkan performa dari turbin angin Savonius yang ditandai dengan kenaikan nilai putaran (n), torsi statis (T_{statis}), dan *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius yang dibandingkan dengan turbin angin Savonius tidak diberi silinder pengganggu.
- 2) Putaran terbesar yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius (n) didapatkan pada jarak $S/D = 1,6$ dengan $Re = 9,0 \times 10^4$ sebesar 613 rpm, sedangkan peningkatan terbesar putaran turbin Savonius akibat adanya konfigurasi pengganggu dibandingkan dengan putaran standar turbin Savonius (n/n_0) didapatkan pada jarak $S/D = 1,6$ untuk $Re = 3,0 \times 10^4$ meningkat sebesar 1,99 kali lebih besar.
- 3) Torsi statis terbesar yang dihasilkan oleh turbin Savonius (T_{statis}) didapatkan pada jarak $S/D = 1,6$ dengan $Re = 9,0 \times 10^4$ sebesar 11,6 N-cm, sedangkan peningkatan terbesar torsi statis turbin Savonius akibat adanya konfigurasi pengganggu dibandingkan dengan torsi statis standar turbin Savonius ($T_{\text{statis}} / T_{\text{statis}0}$) didapatkan pada jarak $S/D = 1,6$ untuk $Re = 6,0 \times 10^4$ meningkat sebesar 2,38 kali lebih besar..
- 4) *Coefficient of Power* terbesar yang dihasilkan oleh turbin Savonius (CoP) didapatkan pada jarak $S/D = 1,6$ dengan $Re = 6,0 \times 10^4$ sebesar 25,05%, sedangkan peningkatan terbesar *Coefficient of Power* turbin Savonius akibat adanya konfigurasi pengganggu dibandingkan dengan *Coefficient of Power* standar turbin Savonius (CoP/CoP_0)

didapatkan pada jarak $S/D = 1,6$ untuk $Re = 3,0 \times 10^4$ meningkat sebesar 14,09 kali lebih besar.

- 5) Performa *Coefficient of Power* terhadap besar *tip speed ratio* didapatkan bahwa semakin besar TSR maka semakin besar nilai *CoP* yang dihasilkan. Adapun nilai *CoP* maksimum didapatkan pada jarak $S/D = 1,6$ sebesar 25,05% pada TSR sebesar 0,95.
- 6) Performa turbin angin Savonius optimal didapatkan pada jarak S/D terdekat yaitu 1,6 dan pada $Re = 6,0 \times 10^4$.

5.2 Saran

Adapun saran perihal eksperimen yang telah dilakukan ini adalah sebagai berikut :

- 1) Perlu dilakukannya penelitian numerik untuk meneliti karakteristik pola aliran ketika melewati silinder pengganggu dan ketika melewati turbin angin Savonius.
- 2) Perlu dilakukannya pemasangan *honeycomb* pada bagian depan dari *blower* untuk mengurangi efek dari *swirl* yang ditimbulkan oleh *blower*.

DAFTAR PUSTAKA

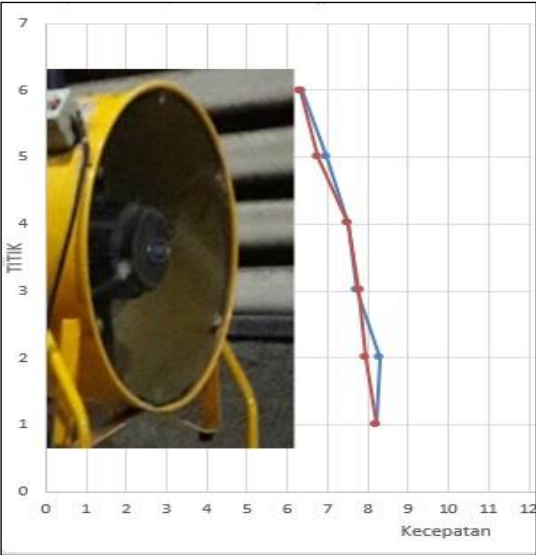
- Al-Shemmeri, T. 2010. *Wind Turbines : First Edition*. ISBN 978-87-7681-692-6
- Altan, B.D., Atilgan, M., dan Ozdamar, A. 2008. “An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining”. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32 (2008) 1673-1678
- Hemami, Ahmad. 2012. *Wind Turbine Technology*. Associate of McGill University, Montreal, Canda and Iowa Lakes Community College, IA, USA
- Igarashi, T. 1981. *Characteristics of the Flow around Two Circular Cylinder Arranged in Tandem..* JSME International Journal Series B 24(188):323-331
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM). 2014. **Outlook Energi Indonesia 2014**. Jakarta
- Mahmoud, N.H., El-Haroun, A.A., Wahba, E., dan Nasef, M.H. 2010. *An Experimental Study on Improvement of Savonius Rotor Performance*. *Renewable Energy* 35 (2010) 2618-2626
- Maskell, E., C. *A Theory of the Blockage Effects on Bluff Bodies and Stalled Wings in a Closed Wind Tunnel*. Ministry of Aviation, Aeronautical Research Council Reports and Memoranda
- Pritchard, Philip J., Fox and McDonald's. 2011. *Introduction of Fluid Mechanics: Eight edition*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Tegar, A. K., 2016. **Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu di Depan Returning Blade Turbin Angin Savonius Terhadap Performa Turbin** “Studi Kasus Untuk Rasio Diameter Silinder Pengganggu Terhadap Diameter Turbin (d/D) = 1”. Tugas Akhir Teknik Mesin ITS; Surabaya

Halaman ini sengaja dikosongkan.

LAMPIRAN

Keseragaman aliran (*uniform flow*) dibutuhkan dalam sebuah penelitian mengenai aliran dapat penelitian yang dilakukan agar didapatkan hasil yang paling ideal. Agar dihasilkan aliran yang *uniform*, biasanya benda uji diuji di dalam sebuah terowongan angin pada *test section*. Akan tetapi, pada penelitian ini benda uji diletakkan di luar *wind tunnel*, hal ini dilakukan agar penelitian ini berada pada kondisi seperti di kondisi aslinya.

Untuk menentukan keseragaman aliran pada kondisi *external flow* lebih sulit dibandingkan pada kondisi *internal flow*. Hal ini dikarenakan pada aliran eksternal memiliki sumber yang tidak hanya 1 titik, melainkan dari banyak titik. Pada penelitian turbin angin Savonius ini, cara menentukan keseragaman alirannya adalah dengan mengatur jarak turbin angin Savonius dan blower. Dimana dilakukan pengujian kecepatan angin pada jarak 2 m, 2,5 m, 3 m, 3,5 m, 4 m dan 4,5 m. Untuk mengetahui besarnya kecepatan dari aliran angin adalah dengan menggunakan anemometer. Kemudian untuk menentukan keseragaman aliran, maka diambil 6 titik secara vertikal dengan mengatur ketinggian dari anemometer, sehingga didapatkan nilai kecepatan pada 6 titik tersebut. Hasilnya, didapatkan bahwa keseragaman aliran didapat pada jarak 4 m. Berikut merupakan data keseragaman aliran pada jarak turbin angin Savonius dengan blower sebesar 4 m.



Gambar A.1 Grafik keseragaman aliran pada jarak 4 m

Tabel A.1 Data kecepatan angin pada jarak 4m

Titik	Kecepatan (m/s)
1	8,2
2	7,94
3	7,79
4	7,49
5	6,78
6	6,33

Tabel A.2 Data Putaran Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Konfigurasi Silinder Pengganggu

S/D	n (rpm)			n/n ₀		
	Re = 30000	Re = 60000	Re = 90000	Re = 30000	Re = 60000	Re = 90000
1,5	160,45	450,17	610,00	1,85	1,41	1,20
1,6	172,62	472,63	613,00	1,99	1,48	1,20
1,7	165,64	455,64	604,00	1,91	1,43	1,18
1,8	164,14	450,45	598,65	1,89	1,41	1,17
1,9	158,72	440,56	591,57	1,83	1,38	1,16
2	150,28	424,94	590,11	1,73	1,33	1,16
2,1	133,17	419,25	579,36	1,53	1,32	1,14
2,2	131,85	400,66	572,94	1,52	1,26	1,12
2,3	115,52	393,18	571,67	1,33	1,23	1,12
2,4	105,64	362,05	562,35	1,22	1,14	1,10
n ₀ (rpm)	86,8	318,7	510			

Tabel A.3 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Konfigurasi Silinder Pengganggu

S/D	T (N-cm)			T/T ₀		
	Re = 30000	Re = 60000	Re = 90000	Re = 30000	Re = 60000	Re = 90000
1,5	1,90	5,50	8,80	1,58	1,49	1,31
1,6	2,00	8,80	11,60	1,67	2,38	1,73
1,7	1,92	7,50	11,10	1,60	2,03	1,66
1,8	1,90	6,76	10,14	1,58	1,83	1,51
1,9	1,83	6,30	9,90	1,53	1,70	1,48
2	1,73	6,00	9,41	1,44	1,62	1,41
2,1	1,50	5,35	8,93	1,25	1,45	1,33
2,2	1,45	5,30	8,44	1,21	1,43	1,26
2,3	1,28	5,00	8,44	1,07	1,35	1,26
2,4	1,20	5,00	8,20	1,00	1,35	1,22
T ₀ (N-cm)	1,2	3,7	6,7			

Tabel A.4 Data *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Konfigurasi Silinder Pengganggu

S/D	<i>CoP</i> (%)			<i>CoP</i> / <i>CoP</i> ₀		
	Re = 30000	Re = 60000	Re = 90000	Re = 30000	Re = 60000	Re = 90000
1,5	6,52	19,31	14,40	7,39	5,34	1,71
1,6	12,27	25,05	14,70	13,92	6,92	1,75
1,7	7,40	23,00	14,03	8,40	6,35	1,67
1,8	7,00	21,03	13,68	7,94	5,81	1,63
1,9	6,45	17,79	13,30	7,31	4,92	1,58
2	5,80	17,70	13,27	6,58	4,89	1,58
2,1	4,87	15,34	12,59	5,52	4,24	1,50
2,2	4,02	13,15	12,66	4,56	3,63	1,51
2,3	2,35	12,40	12,42	2,66	3,43	1,48
2,4	1,07	10,96	12,22	1,22	3,03	1,45
<i>CoP</i> ₀ (%)	0,88	3,62	8,41			

Tabel A.5 Data *Coefficient of Power* dan *Tip Speed Ratio* (λ) pada Re = $3,0 \times 10^4$ dengan Variasi Jarak S/D

S/D	Massa Beban (g)	Pegas (g)	<i>CoP</i> (%)	n (rpm)	λ
1,5	40	20	6,52	160,45	0,65
1,6	75	40	12,27	172,62	0,70
1,7	52	30	7,40	165,64	0,67
1,8	51	30	7,00	164,14	0,66
1,9	40	20	6,45	158,72	0,64
2	49	30	5,80	150,28	0,61
2,1	38	20	4,87	133,17	0,54
2,2	35	20	4,02	131,85	0,53
2,3	30	20	2,35	115,52	0,47
2,4	25	20	1,07	105,64	0,43

Tabel A.6 Data *Coefficient of Power* dan *Tip Speed Ratio* (λ) pada $Re = 6,0 \times 10^4$ dengan Variasi Jarak S/D

S/D	Massa Beban (g)	Pegas (g)	CoP (%)	n (rpm)	λ
1,5	300	130	19,31	450,17	0,91
1,6	390	180	25,05	472,63	0,95
1,7	330	130	23,00	455,64	0,92
1,8	315	130	21,03	450,45	0,91
1,9	290	130	17,79	440,56	0,89
2	285	120	17,70	424,94	0,86
2,1	265	120	15,34	419,25	0,84
2,2	240	110	13,15	400,66	0,81
2,3	235	110	12,40	393,18	0,79
2,4	230	110	10,96	362,05	0,73

Tabel A.7 Data *Coefficient of Power* dan *Tip Speed Ratio* (λ) pada $Re = 9,0 \times 10^4$ dengan Variasi Jarak S/D

S/D	Massa Beban (g)	Pegas (g)	CoP (%)	n (rpm)	λ
1,5	525	210	14,40	610	0,82
1,6	530	210	14,70	613,00	0,82
1,7	460	150	14,03	604,00	0,81
1,8	465	160	13,68	598,65	0,80
1,9	450	150	13,30	591,57	0,79
2	450	150	13,27	590,11	0,79
2,1	450	160	12,59	579,36	0,78
2,2	475	180	12,66	572,94	0,77
2,3	450	160	12,42	571,67	0,77
2,4	490	200	12,22	562,35	0,76

Tabel A.8 Data *Coefficient of Power* dan *Tip Speed Ratio* (λ) pada $S/D = 1,6$ dengan Variasi *Reynolds Number*

Re	Voltase (V)	U (m/s)	CoP (%)	n (rpm)	λ
30000	135	2,47	11,41	160,45	0,65
40000	145	3,30	15,21	255,06	0,77
50000	160	4,12	17,02	311	0,75
60000	170	4,95	25,05	472,63	0,95
70000	180	5,77	20,03	502,8	0,87
80000	195	6,60	19,10	569,45	0,86
90000	220	7,42	14,70	613	0,82

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Batusangkar pada 21 Desember 1994. Merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis berasal dari kota Padang, Sumatera Barat. Pendidikan formal yang telah ditempuh yaitu TK Baiturrahmah Padang, SD Baiturrahmah Padang, SMPN 2 Padang, dan SMA Don Bosco Padang. Setelah itu, penulis melanjutkan pendidikan tingkat sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) melalui jalur mandiri (PKM).

Selama masa perkuliahan, di jurusan Teknik Mesin ITS, penulis aktif dalam bidang kemahasiswaan yaitu sebagai asisten praktikum Mekanika Fluida 1 dan Mesin Fluida Inkompressibel di Laboratorium Mekanika Fluida serta sebagai pengurus Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin ITS. Pada periode 2013/2014 menjabat sebagai Kabiro Alumni Divisi Hubungan Luar, periode 2014/2015 menjabat sebagai staff divisi Hubungan Luar dan menjadi ketua reuni Silver Anniverrary of LBMM ITS, dan pada periode 2015/2016 menjabat sebagai staff divisi Hubungan Luar. Moto hidup penulis adalah tetap berpikir terbuka dan selalu mengambil sisi positif dari setiap masalah yang terjadi di kehidupan. Penulis dapat dihubungi via email dengan alamat ielmanwahid@gmail.com.